

# **Análise da maquinabilidade de componentes em latão**

**Versão final após realização de provas**

**José Alexandre Esteves dos Santos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletromecânica**  
(2<sup>o</sup> ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Helder Joaquim Dinis Correia  
Coorientador: Engenheiro Pedro Henrique da Silva Pimentel

**agosto de 2022**



# Agradecimentos

Primeiramente, expressar gratidão ao meu orientador, Professor Doutor Helder Joaquim Dinis Correia, pela partilha de conhecimentos, orientação e conselhos dados durante a realização deste trabalho. Realçar também a colaboração do Professor Doutor Abílio Manuel Pereira da Silva pela prontidão e conselhos fornecidos na parte prática do trabalho e também ao *fluidslab* pela disponibilidade de colaboração na realização dos ensaios práticos.

À Mepisurfaces Lda. pela oportunidade e confiança, que permitiu a realização do estágio profissional, principalmente ao Engenheiro Pedro Henrique da Silva Pimentel, pelos conhecimentos partilhados que contribuíram para o enriquecimento deste trabalho. Também aos meus colegas que sempre mostraram prontidão e interesse em partilhar as suas experiências e esclarecer qualquer dúvida acerca dos mais diversos temas relacionados com a Maquinação *CNC*.

Reservo também este espaço para agradecer do fundo do coração ao meu pai e à minha mãe que me acompanharam, tanto a nível pessoal, como académico e que contribuíram e proporcionaram o meu sucesso e sempre confiaram em mim e nas minhas decisões. Não existem, nem vão existir, palavras suficientes para descrever a gratidão que sinto por eles. Fica também aqui o registo de agradecimento a todos os meus amigos, pelo companheirismo, amizade e partilha de momentos durante toda a vida académica e que foram também fundamentais todos estes anos para o meu crescimento.

A quem sempre acreditou e me ajudou e a quem me abandonou quando mais precisava, o meu bem-haja.



## Resumo

Esta dissertação é o culminar de um estágio curricular realizado na empresa Mepisurfaces Lda. Esta empresa dedica-se ao polimento de componentes para artigos de luxo e recentemente à maquinação dos mesmos, componentes estes constituídos por ligas de latão com chumbo residual na sua composição. De todos os elementos presentes, o chumbo tem especial importância no processo de maquinação, uma vez que opera como lubrificante possibilitando diminuir os esforços de corte. Devido a pressões internacionais, existe a necessidade de reduzir cada vez mais a presença do chumbo nas ligas de latão dos componentes, com um teor residual de até 0,25% da massa. Esta redução exerce pressão sobre o setor de maquinação, sendo esperada uma diminuição da maquinabilidade do material.

No que à maquinação diz respeito, as diferenças embutidas pelo *Pb* nas ligas *Cu – Zn* são consideráveis, pelo que se procurou então a maquinabilidade da liga de latão empregue na empresa. Nesse sentido, foram realizados diversos ensaios com vista à caracterização do material.

As ferramentas de corte são um dos elementos com maior impacto económico no processo produtivo, pelo que é essencial o seu estudo para compreender a sua influência no processo. O presente trabalho procura apresentar vantagens e/ou desvantagens de soluções de engenharia. Uma das propostas foi a influência do número de insertos de uma fresa no acabamento superficial dos componentes maquinados.

## Palavras-chave

Ligas *Cu – Zn*, Maquinabilidade, Ferramentas de corte



# **Abstract**

This thesis is the result of an internship at Mepisurfaces Lda which is a company dedicated to the polishing of components for high-end companies and most recently towards the machining of the same components. These components are made from brass alloys with a residual composition of lead. From all the components that compose the alloys, lead has a key role in the machining process since it helps reducing cutting efforts with its lubricant ability. Due to international pressure, the presence of lead must be lowered down in brass alloys to a residual content up to 0,25% of the mass of the component. This reduction presents pressure in the machining sector, with an expected reduction of the material machinability.

Regarding machining, the difference that lead makes in Cu-Zn alloys are substantial, because of that it's needed to know better the machinability of the brass alloys used at the company.

Cutting tools are one of the main elements of the whole machining process, having an significant economic impact in the productive process, wherefore it's needed to understand better its influence in the process. The present work seeks to present advantages and/or disadvantages of engineering solutions. One of the proposals was the influence of the number of inserts of a milling cutter on the surface finish of machined components.

# **Keywords**

*Cu – Zn* alloys, Lead, Machinability, Cutting Tools



# **Declaração de Integridade**

Eu, José Alexandre Esteves dos Santos, que abaixo assino, estudante com número de inscrição M9964 de/o Engenharia Eletromecânica da Faculdade de Engenharias, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o Código de Integridade da Universidade da Beira Interior.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, e que em particular atendi à exiguidade referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assim assumo na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 16/08/2022



# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>iii</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>v</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>vii</b>
<b>Declaração de Integridade</b> .....	<b>xi</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>xxi</b>
<b>Nomenclatura</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Mepisurfaces – Empresa e Enquadramento .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Estrutura.....	2
<b>2. Processo de Maquinagem</b> .....	<b>3</b>
2.1 Maquinagem e Maquinabilidade .....	4
2.2 Modelos de corte.....	6
2.2.1 Modelo de corte ortogonal.....	7
2.2.2 Modelo de corte oblíquo .....	8
2.3 Apara.....	8
2.4 Parâmetros de corte.....	11
2.5 Forças e potência de maquinagem .....	12
2.5.1 Pressão específica de corte .....	14
2.5.2 Potência de maquinagem .....	16
2.6 Ferramentas de corte .....	16
2.6.1 Geometria .....	17
2.6.2 Materiais.....	20
2.6.2.1 Aços rápidos.....	21
2.6.2.2 Carbonetos Sinterizados ou Metal Duro ( <i>HM</i> ).....	23
2.6.2.3 Cermets .....	26
2.6.2.4 Carbonetos Sinterizados Revestidos.....	27
2.6.2.5 Cerâmicos .....	27
2.6.2.6 Ultra-duros .....	28
2.6.3 Vida das ferramentas.....	30
2.6.3.1 Mecanismos de desgaste.....	32
2.6.3.2 Tipos de desgastes e falhas .....	34
2.6.3.3 Lei de Taylor .....	35
2.6.4 Revestimentos .....	36
2.7 Qualidade superficial .....	39
2.8 Lubrificação e refrigeração .....	43

<b>3. Ligas Cu – Zn.....</b>	<b>47</b>
3.1. Caraterização das ligas de Cu – Zn.....	47
3.2. Maquinabilidade do latão.....	49
3.3. Maquinagem na Mepisurfaces .....	53
3.3.1. Ferramentas de corte .....	53
3.3.2. Operações e parâmetros.....	53
<b>4. Estudo da maquinabilidade de Ligas Cu-Zn.....</b>	<b>55</b>
4.1. Procedimento experimental .....	55
4.2. Análise e discussão de resultados.....	57
4.2.1. Análise de dureza <i>Vickers</i> .....	57
4.2.2. Análise química.....	58
4.2.3. Ensaio de Maquinagem .....	59
4.2.4. Rugosidades .....	61
<b>5. Conclusões .....</b>	<b>69</b>





# Lista de Figuras

Figura 1 - Processos de maquinagem (Davim, 2008). .....	3
Figura 2 - Modelo de corte ortogonal a) e modelo de corte oblíquo b)(Pinho de Jesus, 2019).....	7
Figura 3 - Diferentes tipos de apara (Davim, 2008). .....	9
Figura 4 - Diversas formas de apara, segundo a norma ISO 3685 (Vanat & Braghini, 2014). .....	10
Figura 5 - Sistema de forças aplicadas na ferramenta(Davim et al., 2013).....	13
Figura 6 - Sistemas de forças aplicadas na broca durante a furação (Davim et al., 2013)...	13
Figura 7 - Variação da pressão específica de corte, função da força de corte, $F_c$ , com a secção $S$ (Ferraresi, 1969). .....	14
Figura 8 - Pressão específica de corte em função da secção da apara não deformada, torneamento (Ferraresi, 1969). .....	14
Figura 9 - Pressão específica de corte para vários grupos ISO de materiais, secção de apara correspondente a $1 \text{ mm}^2$ (L. Amaral, 2017).....	15
Figura 10 - Designações fundamentais da parte ativa da ferramenta de corte (Davim, 2008). .....	18
Figura 11 - Dureza de alguns materiais de ferramentas de corte em função da temperatura de trabalho, em Kelvin (Dadić, 2013).....	20
Figura 12 - Distribuição das categorias dos materiais das ferramentas de corte em função da sua dureza e tenacidade (L. Amaral, 2017).....	21
Figura 13 - Propriedades mecânicas do metal duro em função da percentagem de cobalto (L. Amaral, 2017).....	25
Figura 14 - Influência do tamanho de grão e percentagem de cobalto na dureza do carboneto sinterizado (de Oliveira Guimarães, 2009).....	25
Figura 15 - Dureza de diferentes carbonetos em função da temperatura (Boisse et al., 2003). .....	26
Figura 16 - Resistência ao desgaste e tempo de vida dos materiais (L. Amaral, 2017).....	31

Figura 17 - Influência dos parâmetros de corte ao longo da vida da ferramenta de corte (Quinta, 2018). .....	32
Figura 18 - Desgaste da ferramenta de corte em função dos parâmetros de corte (Pinho de Jesus, 2015). .....	32
Figura 19 - Mecanismos de desgaste em função dos parâmetros de corte e da temperatura de corte (Pinho de Jesus, 2015). .....	33
Figura 20 - Zonas de desgaste em uma ferramenta monofilar (Mikell P. Groover, 2020). .....	33
Figura 21 - Lei de <i>Taylor</i> , relação da vida da ferramenta com a velocidade de corte (Pinho de Jesus, 2015). .....	35
Figura 22 - Comparação resistência ao desgaste, por cratera, consoante o material utilizado como revestimento (Lugscheider et al., 1999). .....	38
Figura 23 - Rugosidade média aritmética associada aos processos de maquinagem (Muhamad et al., 2019). .....	40
Figura 24 - Representação determinação parâmetro rugosidade <i>RzD</i> (Dinis Correia, 2009). .....	41
Figura 25 - Representação determinação parâmetro rugosidade <i>RzI</i> (Dinis Correia, 2009) .....	42
Figura 26 - Refrigeração externa (Ridgeback Engineering Supplies, 2021). .....	45
Figura 27 - Refrigeração interna (Beku Oil GmbH, 2021). .....	45
Figura 28 - Maquinagem com sistema de refrigeração <i>MQL</i> (Unist, n.d.). .....	46
Figura 29 - Maquinagem com sistema de refrigeração abundante convencional. (Unist, n.d.) .....	46
Figura 30 - Diagrama de fases Cu-Zn (Peng, 2017). .....	48
Figura 31 - Aparar de maquinagem das ligas $CuZn_{21}Si_3P$ e $CuZn_{39}Pb_3$ , respetivamente $V_c = 400\text{ m/min}$ ; $f_n = 0.2\text{ mm/rot}$ ; $a_p = 2\text{ mm}$ (Schultheiss et al., 2016). .....	51
Figura 32 - Desgaste comparativo em <i>WC</i> na maquinagem de ligas de latão com diferentes composições de <i>Pb</i> , $CuZn_{21}Si_3P$ com 0.09% e $CuZn_{39}P_3$ com 3% (Schultheiss et al., 2016). .....	52
Figura 33 - Exemplos de microestruturas de ligas de latão com chumbo: 3.3% e 0.9%, respetivamente (Schultheiss et al., 2016). .....	52
Figura 34 - Caracterização amostra em estudo, direções longitudinal e transversal e sentido de maquinagem. ....	56

Figura 35 - Relação dureza vs número de insertos. ....	57
Figura 36 - Relação dureza vs desgaste.....	58
Figura 37 - Medidas inserto intercambiável <i>Kennametal PCD</i> (Kennametal, n.d.).....	60
Figura 38 - Representação da fresa utilizada com três insertos. ....	60
Figura 39 - Parâmetro da rugosidade Ra, na direção longitudinal e transversal. ....	61
Figura 40 - Parâmetro da rugosidade RzD, na direção longitudinal e transversal.....	62
Figura 41 - Parâmetro da rugosidade RzI, na direção longitudinal e transversal.....	62
Figura 42 - Parâmetro da rugosidade RzJ, na direção longitudinal e transversal.....	63
Figura 43 - Parâmetro da rugosidade Rpm, na direção longitudinal e transversal. ....	63
Figura 44 - Parâmetro da rugosidade Rq, na direção longitudinal e transversal. ....	64
Figura 45 - Parâmetro da rugosidade R3z, na direção longitudinal e transversal.....	64
Figura 46 - Influência do número de insertos nos parâmetros da rugosidade na direção longitudinal. ....	65
Figura 47 - Influência do número de insertos nos parâmetros da rugosidade na direção transversal. ....	66
Figura 48 - Efeito do desgaste na direção longitudinal.....	67
Figura 49 - Efeito do desgaste na direção transversal.....	67



## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Pressão específica de corte para vários materiais usando uma ferramenta afiada e com uma profundidade de corte, $a_p = 0.25$ mm. Adaptado de (L. Amaral, 2017; Mikell P. Groover, 2020). .....	15
Tabela 2 - Propriedades das categorias de materiais utilizados nas ferramentas de corte (Davim, 2008). .....	21
Tabela 3 - Composição química e dureza dos aços rápidos do grupo T e M (Davim, 2008). .....	22
Tabela 4 - Classificação dos carbonetos sinterizados (Quinta, 2018). .....	24
Tabela 5 - Composição química e propriedades para metais duros (Davim, 2008). .....	24
Tabela 6 - Propriedades mecânicas de determinados carbonetos (L. Amaral, 2017). .....	26
Tabela 7 - Propriedades dos cerâmicos (G.D. Limited, 2013; Quinta, 2018). .....	27
Tabela 8 - Propriedades mecânicas dos materiais ultra-duros (Davim, 2008; Homem Coimbras, 2014; Shin et al., 2004). .....	30
Tabela 9 - Tipos de desgaste nas ferramentas de corte, causa e solução (Davim, 2008; Kratochvil, 2004; Pantazopoulos, 2003; Sandvik Coromant, n.d.). .....	34
Tabela 10 - Resultados ensaios dureza <i>Vickers</i> . .....	57
Tabela 11 - Resultados análise <i>Fischerscope</i> .....	58
Tabela 12 - Propriedades físicas liga CuZn42 à temperatura ambiente (Aurubis, n.d.) .....	59
Tabela 13 - Características insertos intercambiáveis (Kennametal, n.d.). .....	59
Tabela 14 - Valores parâmetros rugosidade na direção longitudinal. .....	61
Tabela 15 - Valores parâmetros rugosidade na direção transversal. .....	61
Tabela 16 - Avanço por dente das diversas amostras. .....	69



# Nomenclatura

$a_p$	Profundidade de corte
<i>AWF</i>	<i>Ausschuss fur Wirtschaftliche Fertigung</i>
<i>BUE</i>	<i>Built Up Edge</i>
<i>CBN</i>	Nitreto Cúbico de Carbono
<i>Cermet</i>	Compósito de cerâmicos e metais
<i>CNC</i>	Comando Numérico Computorizado ( <i>Computer Numerical Control</i> )
<i>CVD</i>	<i>Chemical Vapour Depositon</i>
$D$	Diâmetro
$F_a$	Força de avanço
$F_c$	Força de corte
<i>FCVA</i>	<i>Filtered Cathodic Vapour Arc</i>
$F_{ec}$	Forção efetiva de corte
$F_m$	Força de maquinagem
$f_n$	Avanço por rotação
$F_p$	Força de profundidade de corte
$f_z$	Avanço por dente
<i>HM</i>	Metal duro ( <i>Hard Metal</i> )
<i>HSS</i>	Aço rápido ( <i>High Speed Steels</i> )
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
$K_s$	Pressão específica de corte
<i>MQL</i>	Quantidade mínima de lubrificação ( <i>Minimal Quantity Lubrication</i> )
<i>MRR</i>	<i>Material Removal Rate</i>
$n$	Frequência de rotação
<i>PACVD</i>	<i>Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition</i>
$P_c$	Potência de corte
<i>PCD</i>	Diamante policristalino
$P_{ec}$	Potência efetiva de corte
<i>PM</i>	Pulverometalurgia
$P_t$	Altura total do perfil
<i>PVD</i>	<i>Physical Vapour Deposition</i>
$R_3Z$	Média da terceira maior altura pico-vale
$R_a$	Rugosidade média aritmética
<i>RCRI</i>	<i>Relative Chip Type Rating Index</i>
<i>RFRI</i>	<i>Relative Force Rating Index</i>
$R_{mD}$	Rugosidade média na norma <i>DIN</i>
$R_{mJ}$	Rugosidade média na norma <i>JIS</i>
$R_p$	Altura máxima de pico

$R_{pm}$	Altura média de pico
$R_q$	Raiz quadrada da média dos quadrados da altura do perfil
$RRRI$	<i>Relative Roughness Rating Index</i>
$R_t$	Altura total da rugosidade
$RTRI$	<i>Relative Tool Wear Rating Index</i>
$R_zD$	Valor médio da altura pico-vale
$R_zI$	Altura de dez pontos
$R_zJ$	Rugosidade máxima média no sistema <i>JIS</i>
$S$	Secção de apara não deformada
$V_c$	Velocidade de corte
$V_{ec}$	Velocidade efetiva de corte
$V_f$	Velocidade de avanço
$z$	Número de arestas de corte na ferramenta

# 1. Introdução

A presente dissertação, para obtenção do grau de mestre em Engenharia Eletromecânica foi desenvolvida em ambiente industrial, no departamento de Maquinação da empresa Mepisurfaces Lda. localizada no Parque Industrial do Canhoso, Covilhã.

## 1.1 Mepisurfaces – Empresa e Enquadramento

A história da Mepisurfaces tem início há mais de quinze anos, dando os primeiros passos numa simples garagem. Nessa altura contava com meia dúzia de trabalhadores, outro nome e outra gerência. Em março de 2013, é criada então a Mepisurfaces, Lda. Iniciando a sua atividade em dezembro de 2013 com a aquisição da estrutura anterior, começando a laborar com cerca de 50 colaboradores, sendo a sua atividade exclusivamente o polimento de metais para o mercado de luxo. Em finais de 2016, a Mepisurfaces, Lda adquire outra empresa do mesmo ramo, passando a contar com cerca de 80 colaboradores (Mepisurfaces, 2020). A empresa integra um grupo franco-suíço, seu principal cliente e investidor. O investimento em formação dos seus colaboradores, em maquinaria e equipamentos tem como objetivo o aumento de capacidade de produção. O principal foco corresponde à implementação de toda a cadeia produtiva em Portugal, iniciando-se com um grande investimento em novas atividades de produção. A implementação da secção de Maquinação no final de 2020, acrescenta um processo produtivo fundamental e essencial à empresa. Desta forma, a secção fabril é atualmente composta por diversos setores, sendo eles: maquinação; polimento por vibração; polimento manual; galvanização e montagem, que conclui o setor produtivo da fábrica.

O material de base para os produtos maquinados pela Mepisurfaces é o latão, utilizado sob a forma de ligas de  $Cu - Zn$  com  $Pb < 300 ppm$ . O latão é o material de eleição para componentes de luxo pois possui boas propriedades térmicas, preço relativamente baixo e outras características atrativas apresentadas mais adiante. Um dos elementos químicos presentes na sua composição que, entre outras propriedades auxilia na maquinação, é o chumbo. Recentemente, estudos e legislações internacionais têm procurado diminuir o teor de chumbo por razões de saúde pública. Deste modo, a diminuição e/ou eliminação do chumbo causará grandes pressões no setor da maquinação, sendo o processo bastante afetado. Os esforços de corte para a maquinação das ligas sem chumbo serão maiores e, conseqüentemente, o desgaste das ferramentas também será mais acentuado (Schultheiss et al., 2016).

## **1.2 Objetivos**

O objetivo do trabalho desenvolvido nesta dissertação traduz-se num estudo do processo de maquinagem e na melhoria do processo produtivo da Mepisurfaces.

Para tal, o conhecimento dos materiais base utilizados é de fundamental importância para uma adequada execução dos diferentes processos de fabrico. Como tal, torna-se necessário realizar ensaios de caracterização dos materiais de modo a possibilitar conhecer as propriedades dos mesmos, tais como ensaios de dureza, análise química e também a medição de rugosidades resultantes de processos de maquinagem. Estes ensaios de caracterização permitem então entender alguns comportamentos dos materiais e retirar algumas conclusões sobre a maquinabilidade dos mesmos.

O principal objetivo deste trabalho é compreender a influência do número de insertos intercambiáveis no acabamento superficial do latão tendo como processo de fabrico o desbaste.

## **1.3 Estrutura**

O presente documento inicia-se com um capítulo introdutório, onde é realizada uma breve contextualização com a apresentação da empresa e motivos que originaram a escolha deste tema, os objetivos a cumprir e, por fim, a apresentação da estrutura adotada para a dissertação.

Nos capítulos 2 e 3 apresenta-se uma revisão bibliográfica que resultou de um processo de pesquisa incessante envolvendo uma hierarquização de tópicos subjacentes ao tema central do trabalho, de modo a ser possível adquirir um conhecimento sustentado acerca da maquinagem em geral, das ligas de latão e, principalmente, da maquinabilidade de ligas de latão. A quantidade de informação disponibilizada acerca da maquinabilidade do latão, principalmente de ligas de latão sem chumbo facilitou bastante esta revisão bibliográfica. Preendeu-se a informação essencialmente a bases de dados de artigos científicos, dissertações e livros técnicos para obter a maior qualidade possível de informação.

No capítulo 4 empregaram-se alguns conhecimentos previamente adquiridos nos capítulos antecedentes relativamente à maquinabilidade do latão. Assim, procurou-se fazer uma sistematização dos dados provenientes dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas do material e a influência do número de insertos intercambiáveis no acabamento superficial.

Por fim, no capítulo 5, apresentam-se as conclusões retiradas do presente trabalho.

## 2. Processo de Maquinagem

Com os avanços tecnológicos no mundo moderno, a fabricação de peças está cada vez mais desenvolvida, como tal existe a necessidade de diversos processos de fabrico para a conceção das mesmas. Esta conceção ocorre de processos como a fundição, soldadura, conformação plástica e maquinagem, sendo estes regularmente utilizados de forma complementar.

De entre estes, destacam-se os processos de fabrico por arranque de apara, também conhecidos como processos de maquinagem. Esta indústria é uma das mais importantes no setor metalomecânico e é a que tem maior influência e aplicação no presente trabalho desenvolvido.

No que diz respeito à maquinagem convencional, existem diversos processos de remoção de material, com especificidades de adequações distintas, tendo somente em comum todos estes processos a remoção de apara do material. Para a remoção de apara é necessária existir movimento relativo entre a ferramenta e a peça, caracterizado por uma velocidade de corte e um avanço. Os principais processos de maquinagem são representados de seguida na Figura 1.

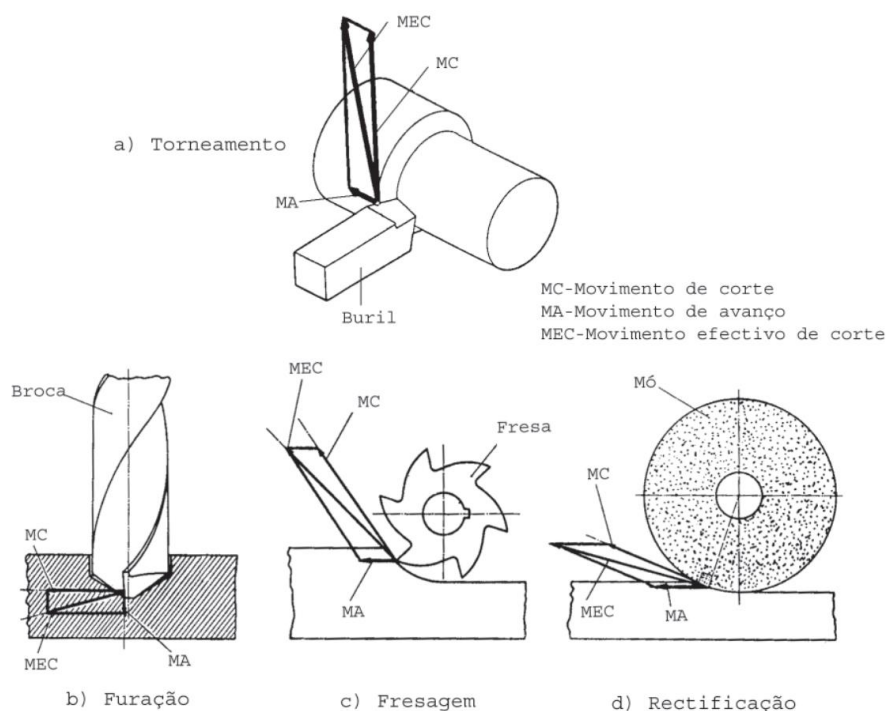


Figura 1 - Processos de maquinagem (Davim, 2008).

Considerando o objetivo do presente trabalho, é imperativo a apresentação de uma breve revisão bibliográfica ao tema da Maquinagem.

## **2.1 Maquinagem e Maquinabilidade**

O termo maquinagem corresponde ao termo genérico para a descrição do processo de fabrico que envolve a remoção de material de modo controlado com o intuito de obter uma configuração final de uma peça maquinada. Este processo pode ser integral, sendo a transformação do material desde a matéria-prima até ao produto final, ou utilizado como complemento de qualquer outro processo de fabrico, sendo maioritariamente utilizado em operações de acabamento. Este processo envolve essencialmente três elementos, sendo eles a máquina-ferramenta onde ocorre a operação, a peça a ser maquinada e a ferramenta (Batista, 2010; Davim, 2008). O processo de maquinagem qualifica-se pela qualidade superficial e pela capacidade a garantir as tolerâncias dimensionais e geométricas exigidas. O elevado tempo consumido na elaboração do procedimento é apontado como uma das principais desvantagens associadas ao processo, sendo este elevado comparativamente a processos de fabrico como a fundição. O processo classifica-se segundo duas categorias: maquinagem convencional e maquinagem não convencional. Sendo o processo utilizado no desenvolvimento deste trabalho a maquinagem convencional, apenas esse será aprofundado. A maquinagem convencional diferencia-se pela remoção de material por formação de aparas, ocasionada pela aplicação de esforços de corte por meio de uma ferramenta em contacto direta com a peça a maquinar. O mecanismo de base envolvido no processo de corte por remoção de aparas representa uma deformação localizada e induzida no material de trabalho imediatamente antes da ponta da ferramenta. Esta deformação é motivada pelo movimento relativo entre a ferramenta e a peça, gerando compressão do material junto à aresta de corte. Portanto, o aumento das forças de corte provoca um aumento das tensões de corte de tal forma que inicia um processo de escorregamento, sem perda de coesão entre o material removido e a peça. O aparecimento de aparas pode ser causado pela formação de fissuração na região de corte por meio da penetração da ferramenta em relação à peça. Como processos de maquinagem por corte de aparas é de salientar o torneamento, furação e a fresagem.

Com a introdução do conceito de maquinagem, é imperativo a introdução do conceito de maquinabilidade. Este conceito pode ser definido como a maior ou menor facilidade de trabalhar um qualquer objeto por meio de uma ferramenta de corte, sucedendo arranque por aparas e alteração da geometria para alcançar uma forma final (Quinta, 2018). Afirma-se que uma boa maquinabilidade alude a um bom acabamento superficial, baixa potência de corte consumida e um baixo desgaste da ferramenta (Batista, 2010).

Como referido anteriormente, o processo de maquinagem é influenciado por inúmeras variáveis, frequentemente difíceis de controlar e/ou prever, de seguida apresentam-se algumas delas:

- Máquina-ferramenta
  - A adequação dos parâmetros de corte à qualidade ou produtividade desejada, consoante as características da peça e da ferramenta podem ser fatores condicionantes ao processo de maquinagem. Sendo também a potência disponibilizada pela máquina ao processo um fator relevante. Não obstante ao facto de os equipamentos serem projetados para diminuir esta imposição ao processo, poderá nalguns casos específicos este ser relevante;
  - O aumento dos avanços rápidos tem sido um objetivo constante para os fabricantes, o tempo gasto nos avanços rápidos de reposicionamento das cabeças de corte e na troca de ferramentas não são considerados tempos úteis. Desta forma, cada vez mais o tempo influencia os custos dos processos;
  - O porta-ferramentas, na sua capacidade de número de ferramentas que suporta e os tempos de troca de ferramenta são possíveis condicionantes a todo o processo;
  - A qualidade das peças produzidas é influenciada pelo estado e robustez da máquina, pela existência de folgas quer no posicionamento das peças, quer na execução dos movimentos das ferramentas.
- Material da peça
  - O material da ferramenta de corte e a maquinabilidade da peça são afetados diretamente pela composição química. A maquinabilidade é afetada pelos elementos químicos, pelo tamanho de grão, inclusões à superfície, constituintes duros e outros tipos de impurezas. Também a resistência mecânica do material a maquinar resultante da composição do material ou de processos de tratamento prévios afetam a maquinabilidade (Homem Coimbras, 2014);
  - De forma a obedecer todas as especificações e mantendo todo o processo o mais eficiente possível é essencial precaver a geometria das peças a maquinar, as respetivas tolerâncias e o estado da superfície exigidos;
- Ferramenta de corte
  - A composição da ferramenta de corte necessita na sua composição elementos que proporcionem uma dureza superficial superior à da peça a maquinar e capacidade de resistência às temperaturas de maquinagem sem danificar as suas propriedades. Para além da dureza superficial necessitar de combater a

abrasividade, o substrato da ferramenta de corte requer também de tenacidade para sustentar os esforços induzidos pelo processo de corte sem fraturar a mesma (Mikell P. Groover, 2020);

- A utilização da ferramenta e o conseqüente desgaste da mesma provoca alterações na geometria, impedindo um desempenho eficiente com impacto na qualidade das peças maquinadas;
- É necessária uma adequação da geometria da ferramenta ao perfil geométrico pretendido para a peça maquinada. O número de arestas de corte influencia bastante o processo, podendo levar a gastos económicos desnecessários no caso de arestas a mais e a esforços elevados e baixos níveis de produtividade com arestas a menos;
- Preparação do processo
  - Qualquer folga existente no aperto da peça proveniente de uma má fixação da peça à máquina ou falta de limpeza superficial pode provocar desvios nas operações pretendidas. A presença de limalhas ou outros contaminantes podem causar desalinhamentos na maquinagem e afetar o desempenho da ferramenta de corte, caso haja uma interferência com as ferramentas;
  - Para que a maquinagem decorra da melhor forma é necessário adequar os parâmetros de corte considerando a peça a maquinar e a ferramenta a utilizar, sendo estes fatores decisivos. Parâmetros de corte errados podem provocar vibrações, desgaste excessivo das ferramentas e microfissuras na peça.

## **2.2 Modelos de corte**

Considerando a complexidade do fenómeno de corte por arranque de aparas, resultado do grande número de fatores em jogo, surge a necessidade da criação de um modelo físico/matemático que, baseado num conjunto de hipóteses simplistas, fosse capaz de traduzir a realidade o mais aproximada possível e deduzir conseqüências confirmadas pela experiência (Davim, 2008).

Sobre esta necessidade surgem diversos modelos, longe de um consenso, mas com resultados satisfatórios e de grande utilidade para a compreensão do fenómeno, destacando-se dois modelos em particular: corte ortogonal Figura 2 a) e corte oblíquo Figura 2 b).

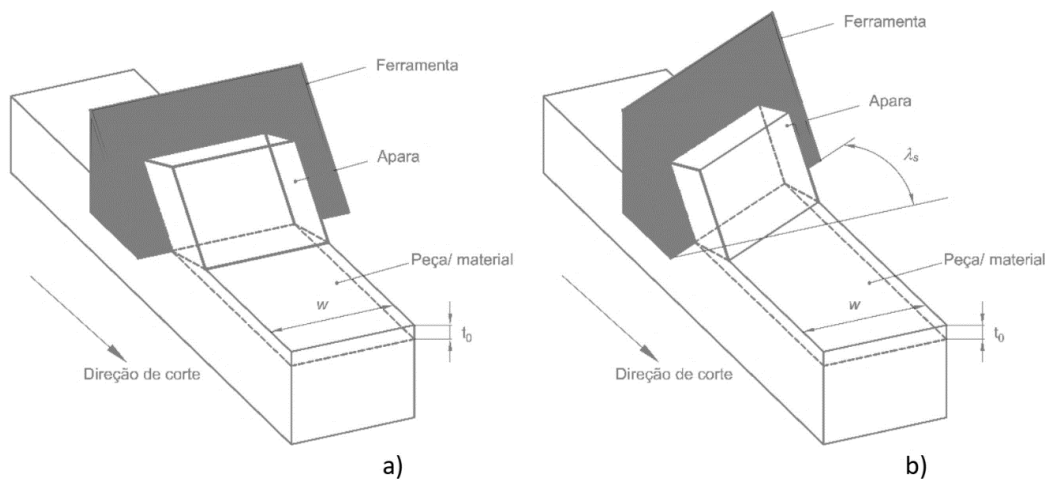


Figura 2 - Modelo de corte ortogonal a) e modelo de corte oblíquo b)(Pinho de Jesus, 2019)

### 2.2.1 Modelo de corte ortogonal

Este modelo de corte apresenta uma representação mais simplificada quando comparado com o modelo de corte oblíquo, no que ao tratamento matemático diz respeito, já que permite eliminar muitas das variáveis independentes. Tudo isto resulta da consideração de que o processo de corte é bidimensional com formação de avara contínua, sendo que a ferramenta de corte atua de forma perpendicular à direção do movimento relativo ao material de trabalho. Por outras palavras, o corte entende-se por ortogonal quando a direção efetiva de corte e a velocidade efetiva de corte são perpendiculares à aresta de corte (Davim, 2008; Ferraresi, 1969; Pinho de Jesus, 2015).

Embora este modelo só seja aproximado em alguns processos de torneamento, esta simplificação não altera a essência do fenómeno, uma vez que as conclusões a que este modelo conduz são aplicáveis ao corte tridimensional de forma muito satisfatória (Davim, 2008; Ferraresi, 1969; Pinho de Jesus, 2015).

Outra aproximação feita relaciona-se com a profundidade da camada de material removida pela ação da ferramenta. Esta é conhecida como a espessura da avara não deformada e, embora na prática esta dimensão varie à medida que o corte prossegue, de modo a facilitar a análise teórica do processo, esta passa a ser considerada constante. Existe ainda um outro conjunto de condições adotadas que tornam o modelo ortogonal uma boa aproximação, nomeadamente o facto de se considerar que o material a maquinar apresenta uma deformação elástica desprezável, estipulou-se que a deformação da avara é plana e o comprimento da aresta de corte superior à largura de corte, que a força de atrito, entre a avara e a face de ataque, é proporcional à componente normal da força e que a ação da ferramenta de corte sobre a peça reduz-se a uma força aplicada na aresta de corte. Por outro

lado, nesta modelação, não são tomados em consideração aspetos como o efeito térmico nas características mecânicas do material a maquinar, a deformação plástica na face de ataque da ferramenta de corte e o efeito do desgaste sobre a geometria de corte (Davim, 2008; Ferraresi, 1969).

### **2.2.2 Modelo de corte oblíquo**

Embora em algumas operações de maquinagem, tais como o sangrar ou ranhurar em torneamento, e a fresagem cilíndrica tangencial se possam considerar operações de corte bidimensional, a maioria das operações são de corte tridimensional e como tal deve ser considerado o modelo de corte oblíquo.

Neste modelo, a aresta de corte da ferramenta deixa de estar disposta perpendicularmente à velocidade de corte, de tal modo que se verifica a existência de ângulo de inclinação da aresta de corte e do ângulo de posição da aresta de corte, obrigando a apara a um desvio relativamente à direção perpendicular à aresta de corte, provocando a variação do ângulo de ataque normal e do comprimento de contacto apara/ferramenta.

Enquanto no modelo de corte ortogonal o fluxo da apara toma uma direção normal à aresta de corte, neste modelo tal não acontece uma vez que a apara tende a escoar segundo um percurso inclinado, em relação à normal. Desta forma, alguns investigadores desenvolveram expressões que permitem relacionar os novos parâmetros adicionados por este modelo, de tal forma que podem ser utilizadas as considerações apresentadas no modelo de corte ortogonal (Davim, 2008).

## **2.3 Apara**

A apara constitui um elemento importante de análise da maquinabilidade de um qualquer material. Por isto, a sua caracterização é feita consoante o seu tipo e a sua forma. O tipo de apara obtido no processo de maquinagem depende de fatores como o material a maquinar, parâmetros e ferramentas de corte. No estudo dos vários tipos de apara, é considerado neste trabalho um modelo de corte ortogonal. Consoante as forças e os materiais envolvidos, pode apresentar-se, essencialmente, sob três tipos:

- Apara descontínua: Caracterizada por segmentos, é característica de processos de maquinagem a baixas velocidades de corte com pequeno ângulo de ataque, um alto penetramento também propicia o aparecimento deste tipo de apara. O ângulo de ataque da ferramenta consiste no ângulo entre a face de ataque e o plano de referência, sendo explicado mais detalhadamente mais à frente neste trabalho. Esta formação verifica-se maioritariamente na maquinação de materiais frágeis ou de

baixa ductilidade, como ferro fundido, bronze e latão. No entanto, também se sucede na maquinação de materiais dúcteis em que ocorre alta fricção entre a ferramenta de corte e a peça a maquinar, produzindo um mau acabamento superficial (Pinho de Jesus, 2015).

- Apara contínua regular: Corresponde a uma apara composta por um segmento contínuo de material, associada à deformação plástica contínua sem fratura à frente da aresta de corte. Este tipo de apara é gerado, normalmente, na maquinação de materiais dúcteis a altas velocidades de corte e baixo avanço, oferecendo uma qualidade superficial elevada após maquinação. A formação ocorre tendencialmente quando o atrito é baixo, significando que o desgaste da ferramenta é menor, aumentando o tempo de vida e diminuindo também a energia necessário ao corte. Por forma a garantir este tipo de apara, é necessário a utilização de lubrificantes e líquidos de refrigeração.
- Apara contínua irregular: Dentro da apara contínua é possível o aparecimento de uma variante designada por apara contínua com bordo aderente (*BUE – Built Up Edge*). Característica de materiais dúcteis maquinados a baixas velocidades de corte com e sem lubrificação. Esta apara aderente é consequência do atrito na face de ataque da ferramenta e da variação das propriedades mecânicas dos materiais com a temperatura (Davim, 2008).

Ocorre na maquinação de materiais dúcteis a baixas velocidades, com excesso de fricção entre a ferramenta e a peça a maquinar, por falta de refrigeração, aumentando a temperatura na zona de contacto (Davim, 2008; Pinho de Jesus, 2015).

A modificação dos parâmetros de maquinação numa operação de corte de um dado material pode determinar alterações no tipo de apara produzida. Assim, vibrações da ferramenta podem modificar uma apara contínua, apresentando variações sensíveis de espessura se a vibração for ligeira ou transformando numa apara de tipo “descontínua não fragmentada”, se a vibração por outro lado for elevada.

Na Figura 3 são apresentados os três tipos de apara anteriormente referidos.



Figura 3 - Diferentes tipos de apara (Davim, 2008).

De seguida são apresentadas, na Figura 4, as diversas formas que a apra pode originar segundo a norma ISO 3685 (International Standard, 1993; Vanat & Braghini, 2014).




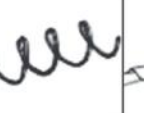


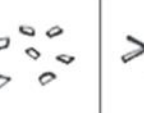
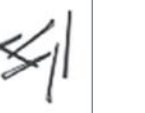




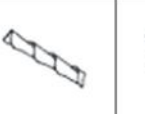
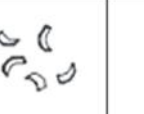





1 - Cavaco em fita	2 - Cavaco tubular	3 - Cavaco espiral	4 - Cavaco hel. tipo arruela	5 - Cavaco hel. cônico	6 - Cavaco em arco	7 - Cavaco fragmentado	8 - Cavaco tipo agulha
							
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
							
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
							
1-3 - Emaranhado	2-3 - Emaranhado		4-3 - Emaranhado	5-3 - Emaranhado			

Figura 4 - Diversas formas de apra, segundo a norma ISO 3685 (Vanat & Braghini, 2014).

O fenómeno de remoção de apra deve ser tido em conta também na avaliação do desgaste da ferramenta, visto que a apra é responsável pela remoção de uma parte do calor gerado durante o processo de maquinagem. O controlo da direção de saída e da forma da apra tem especial interesse pois permite uma evacuação da zona de trabalho, evitando o enroscamento nas partes móveis da máquina, na ferramenta e nas peças maquinadas. Para além dos danos que pode provocar nestes elementos é perigoso para o operador. Este problema é de especial importância quando se trata de maquinagem de materiais dúcteis a velocidades de corte elevadas, devido à formação de aparas resistentes cujo escoamento é consideravelmente célere sobre a face de ataque, tornando-se estas perigosas.

Distinguem-se oito formas de apra: apra lisa ou de fita, geralmente indesejável, uma vez que apresenta grande volume e dificuldades na evacuação; apra helicoidal, uma produção de reduzido volume de fácil escoamento torna este tipo de apra desejável, o mesmo acontece com a apra em espiral. A apra em lasca é preferível na existência de espaço disponível reduzido para a evacuação ou quando a sua remoção for forçada por ação de um fluido de corte (Davim, 2008).

## 2.4 Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte também são de extrema importância no processo de maquinagem, influenciando os três elementos-chave: máquina-ferramenta, ferramenta e material a trabalhar. Estes controlam o movimento relativo entre a peça e a aresta de corte da ferramenta. Destes movimentos sobressai o movimento de corte, movimento de avanço e o movimento efetivo de corte, responsáveis pela formação de aparta. Subsistem ainda movimentos de penetramento, ajuste e de posicionamento (Ferraresi, 1969).

Numa operação de maquinagem, é imprescindível estabelecer a solução que maximiza a produtividade em função dos custos e da qualidade superficial pretendida. O movimento relativo entre a ferramenta e a peça é usualmente caracterizado através de três parâmetros principais de corte, sendo que, destes parâmetros, será sempre obrigatória a definição de pelo menos dois deles, que sejam independentes (L. Amaral, 2017; Pinho de Jesus, 2015; Quinta, 2018). No caso de uma operação de fresagem, podem definir-se as seguintes relações entre os parâmetros de corte (L. Amaral, 2017):

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi D} \quad [rot/min] \quad [1]$$

$$V_f = f_z \cdot n \cdot z \quad [mm/min] \quad [2]$$

O movimento de corte corresponde ao movimento entre a peça e a ferramenta que origina uma remoção singular de aparta ao longo de uma rotação ou curso, mas que por si só não permite a remoção de novos fragmentos de material. Considera-se parâmetros de corte a velocidade de corte ( $V_c$ ), que é a maior das velocidades relativas da ferramenta ou peça, o avanço ( $f_n$ ) que corresponde à distância percorrida pela ferramenta por rotação ou curso e penetramento ou profundidade de corte ( $a_p$ ). Estes parâmetros são dependentes da operação de maquinagem pretendida, da ferramenta de corte, da geometria, das propriedades do material a maquirar e da ferramenta, tendo por base a relação produtividade/qualidade superficial pretendida para a peça. O movimento efetivo de corte é resultado da composição dos dois movimentos anteriores, realizados simultaneamente (Davim, 2008; Ferraresi, 1969; Soares, 2016). De salientar também os parâmetros velocidade de avanço  $V_f$  (velocidade de avanço) e  $f_z$  (avanço por dente).

A taxa de remoção do material (*MRR – Material Removal Rate*), equivale a um conceito extremamente importante no processo de maquinagem. Obtém-se pela multiplicação dos

três parâmetros anteriormente expostos, é geralmente descrita em  $cm^3/min$ , a operação de torneamento tem como referência [ 3 ]:

[ 3 ]

$$MRR = v_c \cdot a_p \cdot f_n$$

Um ajuste entre os parâmetros de corte distingue dois métodos com características distintas: maquinar em desbaste e maquinar em acabamento. Levando em consideração estas parametrizações, pode inferir-se que para operações de desbaste exigindo maiores esforços, são aplicadas menores velocidades de corte e profundidades de corte maiores, enquanto que, para operações de acabamento, são aplicadas maiores velocidades de corte e profundidades de corte menores (L. Amaral, 2017; Mikell P. Groover, 2020).

Conclui-se assim que os parâmetros de corte devem ser ajustados de modo a obter a qualidade superficial exigida no acabamento e no caso de desbaste, que o *MRR* seja tanto maior quanto possível, de modo a que este processo apresente máxima rentabilidade (Soares, 2016).

## **2.5 Forças e potência de maquinagem**

A força de contacto, responsável pelo arranque de apara e conseqüente maquinagem da peça, é resultado do contacto entre a peça e a ferramenta. Embora a maquinagem advenha do movimento relativo entre peça/ferramenta, consideram-se as componentes dessa força a atuar num ponto de referência cuja posição não varia com as condições de corte.(Davim et al., 2013; Kalpakjian & Schmid, 2016).

A força de contacto pode também ser designada por força de maquinagem ( $F_m$ ), representada na Figura 5 para uma operação de torneamento cilíndrico, e pode ser decomposta segundo as três direções ortogonais – a força de corte ( $F_c$ ), a força de avanço ( $F_a$ ) e a força de penetramento ( $F_p$ ).

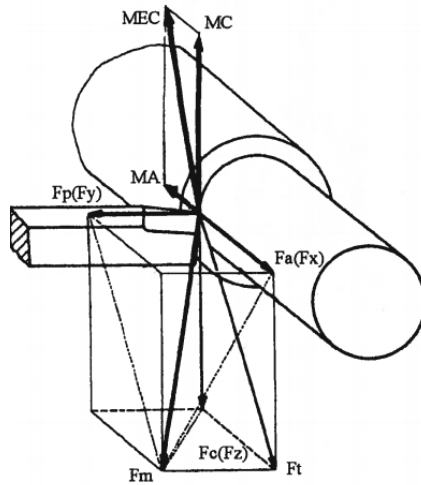


Figura 5 - Sistema de forças aplicadas na ferramenta(Davim et al., 2013).

Esta força de maquinagem é então deduzida a partir da equação:

[ 4 ]

$$F_m = \sqrt{F_a^2 + F_p^2 + F_c^2} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

Para o processo de furação é comum a utilização das forças de avanço e o binário, como observado na Figura 6. Isto acontece porque no caso de uma broca com as arestas de corte perfeitamente afiadas ou com um desgaste equilibrado as forças de penetramento não são significativas, ficando por isso o estado de carga definido pela força de avanço e pelo binário (Davim, 2008; Davim et al., 2013).

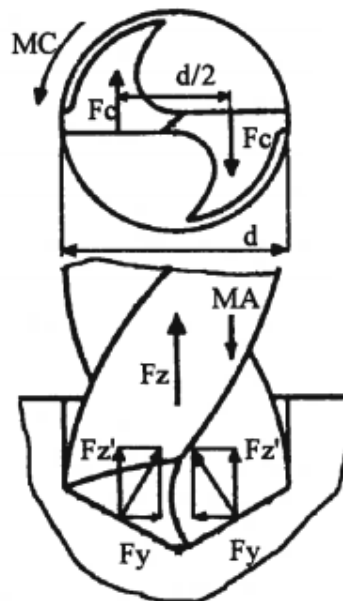


Figura 6 - Sistemas de forças aplicadas na broca durante a furação (Davim et al., 2013).

### 2.5.1 Pressão específica de corte

A pressão específica de corte ou energia específica de corte ( $K_s$ ), é um parâmetro capaz de avaliar a eficiência do processo de corte, sendo definida por:

$$K_s = \frac{F_c}{S} = \frac{F_c}{a_p \cdot f_n} \quad [5]$$

Onde  $F_c$  corresponde à força de corte e  $S$  à secção da avara não deformada dada pelo produto da profundidade de corte  $a_p$ , pelo avanço  $f_n$  (L. Amaral, 2017).

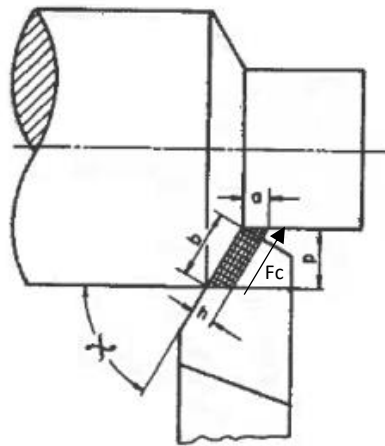


Figura 7 - Variação da pressão específica de corte, função da força de corte,  $F_c$ , com a secção  $S$  (Ferraresi, 1969).

A pressão específica de corte é inversamente proporcional à área de secção de corte e a sua relação é ilustrada nas seguintes figuras, para o caso de ligas de latão e para os restantes materiais.

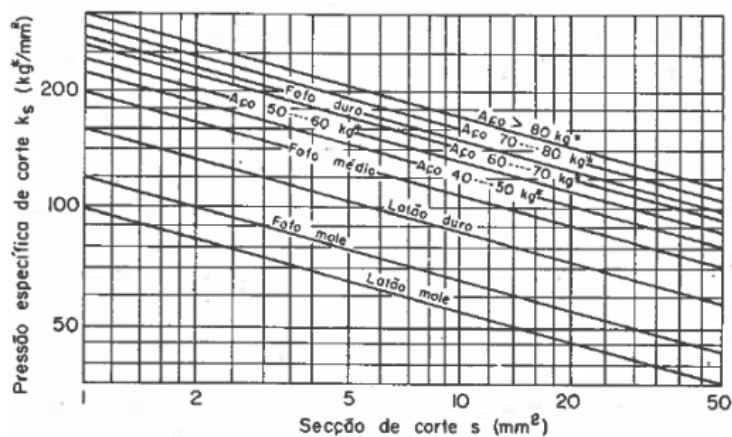


Figura 8 - Pressão específica de corte em função da secção da avara não deformada, torneamento (Ferraresi, 1969).

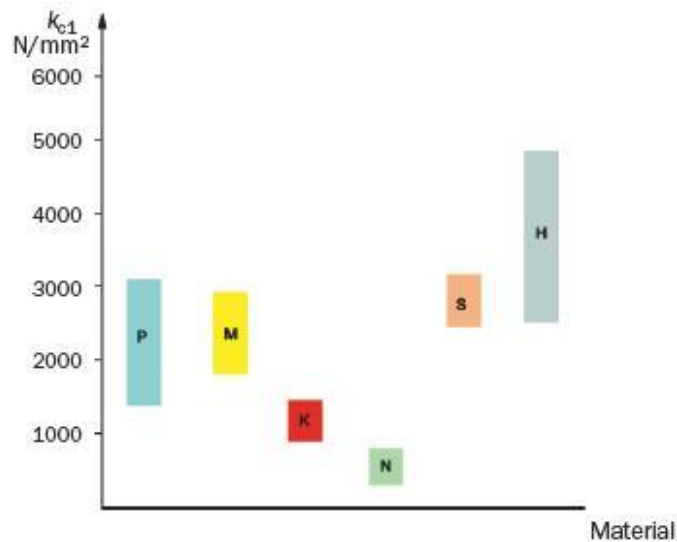


Figura 9 - Pressão específica de corte para vários grupos ISO de materiais, secção de avara correspondente a 1 mm<sup>2</sup> (L. Amaral, 2017).

A pressão específica de corte varia fundamentalmente consoante a variação dos parâmetros de corte, o material base a maquinar e a ferramenta de corte. A Tabela 1 indica, para diferentes materiais, as respetivas pressões específicas de corte. Para uma mesma ferramenta, a utilização de velocidades e profundidades de corte elevadas faz convergir a pressão específica de corte para um determinado patamar de estabilidade.

Tabela 1 - Pressão específica de corte para vários materiais usando uma ferramenta afiada e com uma profundidade de corte,  $a_p = 0.25 \text{ mm}$ . Adaptado de (L. Amaral, 2017; Mikell P. Groover, 2020).

Material	Dureza <i>Brinell</i>	Pressão específica de corte [ $N/mm^2$ ]
Aço ao carbono	150-200	1600
	200-250	2200
	250-300	2800
Aço inoxidável	150-250	2800
Aço ligado	200-250	2200
	250-300	2800
	300-350	3600
	350-400	4400
Alumínio	50-100	700
Bronze	100-150	2200
Ferro fundido	125-175	1100
	175-250	1600
Latão	100-150	2200
Ligas de alumínio	100-150	800
Ligas de magnésio	50-100	400

O interesse prático por este parâmetro reflete-se na possibilidade de estimar, ainda que de forma aproximada, os esforços de corte. De entre as várias fórmulas existentes na literatura, destaca-se a proposta da *AWF* (*Ausschuss für Wirtschaftliche Fertigung*), onde é definida a pressão específica de corte pela seguinte fórmula de correlação (Davim, 2008; Ferraresi, 1969):

$$K_s = \frac{C_w}{f_n^{0.47}} \quad [6]$$

Onde  $C_w$  é uma constante do material,  $C_w = 54$  no caso do latão, e  $f_n$  o avanço em  $mm/rot.$

### 2.5.2 Potência de maquinagem

O cálculo da potência de acionamento máquina/ferramenta, é imprescindível identificar qual a potência necessária para o processo em causa, bem como o rendimento do equipamento. A potência de corte ou potência efetiva de corte necessária ao processo de maquinagem, é dada pelo produto da força de maquinagem na direção de corte com a velocidade de corte efetiva (L. Amaral, 2017; Ferraresi, 1969; Soares, 2016):

$$P_{ec} = \frac{F_{ec} \cdot V_{ec}}{60} = \frac{F_c \cdot V_c + F_a \cdot V_a}{60} \quad [W] = [N] \cdot [m/s] \quad [7]$$

Dado que a força e a velocidade na direção de avanço são bastantes reduzidas quando comparadas com a força e velocidade na direção de corte, estas componentes podem ser desprezadas e a potência passa a ser dada por:

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60} \quad [W] = [N] \cdot [m/s] \quad [8]$$

## 2.6 Ferramentas de corte

Uma ferramenta de corte é composta por duas zonas perfeitamente distintas: o corpo e a parte ativa. A qualidade do trabalho executado e a economia da operação dependem expressivamente da natureza da ferramenta de corte, da geometria da sua parte ativa, da sua parte ativa, da sua posição relativamente à superfície a maquinar e das condições de corte (Davim, 2008). A caracterização geométrica das ferramentas de corte pode ser elaborada através dos seus elementos funcionais. As ferramentas de corte são essenciais e de extrema relevância no processo de maquinagem, sendo estes os elementos que efetivam o corte do material. O processo de maquinagem é expressivamente influenciada pela escolha criteriosa dos parâmetros relativos à ferramenta de corte, como a geometria,

material, revestimento, posição relativa à peça, ângulo de ataque, entre outros. Tais parâmetros carecem especial atenção uma vez que a negligência dos mesmos pode conduzir a consequências económicas desfavoráveis.

Considerando o material a maquinar, as propriedades exigidas para as ferramentas variam consoante a sua aplicação. De um modo geral, uma ferramenta de corte apropriada requer as seguintes características (Davim, 2008; Ferraresi, 1969; Mikell P. Groover, 2020).

- Elevada resistência ao desgaste;
- Resistência ao calor produzido no processo;
- Elevada condutividade térmica;
- Elevada tenacidade
- Quimicamente inerte;
- Baixo coeficiente de atrito;
- Baixo coeficiente de dilatação térmica.

### **2.6.1 Geometria**

A geometria das ferramentas de corte tem grande importância no processo de formação de apanha, uma vez que condiciona o tipo de apanha que se forma, a distribuição das temperaturas e as forças de corte sobre a ferramenta. A configuração geométrica também influencia expressivamente os parâmetros de corte e o acabamento superficial.

Quanto à sua construção, a parte ativa da ferramenta aparece sob a forma de:

- Pastilhas, insertos ou plaquetas: caracterizado por ser um componente bastante objetivo e simples de manipular, facilmente adaptável a vários tipos de materiais. A sua desvantagem detém-se na necessidade de substituição do corpo da ferramenta caso o perfil a maquinar se altere;
- Integrais: neste caso a ferramenta é geralmente produzida a partir de um varão do material pretendido para a ferramenta (geralmente *HM* ou *HSS*);
- Insertos brazados: grande durabilidade e possibilidade de geometrias complexas, usualmente são fabricados em *HM*. No entanto, os custos de fabrico são notavelmente elevados.

Quanto ao tipo de construção, estas podem ainda ser classificadas de um outro modo, sendo então ferramentas *standard* ou ferramentas especiais. As primeiras correspondem a ferramentas *standardizadas*, com um baixo custo e limitação geométrica. A outra categorização assume diversas geometrias e complexidade com consequência no seu custo elevado.

A estrutura da ferramenta apresenta-se sob duas formas distintas: sem suporte incorporado ou com suporte incorporado. Sem suporte identifica-se mais versáteis, subsistindo a possibilidade de serem utilizadas em diferentes suportes, com o inconveniente da eventualidade de acumulação de resíduos de limalhas na junção suporte/ferramenta. As ferramentas com suporte incorporada apresentam um custo mais elevado (1,5 a 2 vezes o valor de ferramentas sem suporte incorporado) (L. Amaral, 2017), no entanto com a ausência de junções, não existe possibilidade de acumular resíduos e ocorrem menos vibrações em trabalho.

Relativamente à parte ativa da ferramenta de corte é de salientar as seguintes designações fundamentais: a face de ataque, a face da saída principal, a face de saída secundária, a aresta de corte principal, a aresta de corte secundária e a ponta ou bico.

A face de ataque é a superfície sobre a qual existe formação e escorregamento de apana. As faces de saída são as superfícies da cunha cortante que se topam frente a frente com as superfícies de corte. A aresta de corte principal advém da interseção da face de ataque e da face de saída principal. A ponta da ferramenta corresponde à zona da parte ativa na qual se interseccionam as arestas de corte principal e secundária. Podendo esta ser arredondada ou chanfrada.

Na Figura 10 é possível observar todas as designações fundamentais da parte ativa da ferramenta de corte.

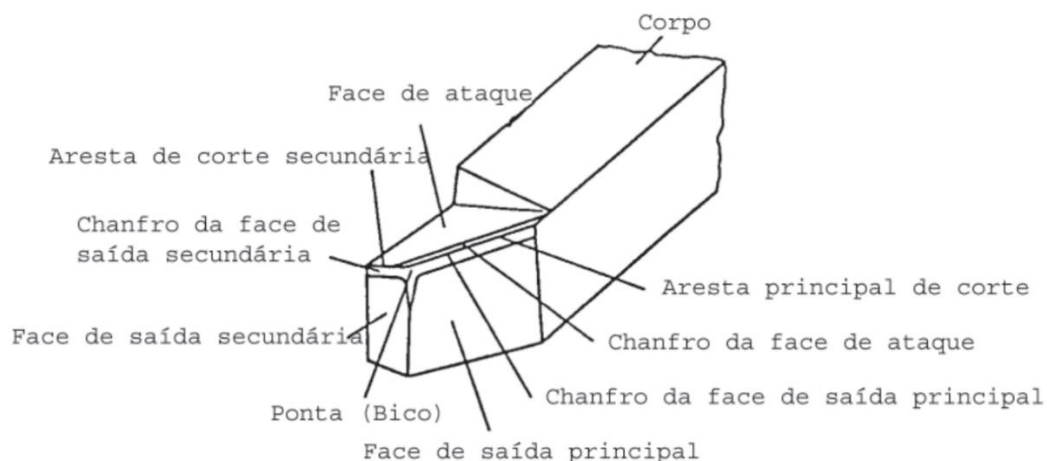


Figura 10 - Designações fundamentais da parte ativa da ferramenta de corte (Davim, 2008).

O ângulo de posição da aresta de corte estabelece o comprimento de contacto entre a ferramenta e o material base a maquinar, sendo este responsável pela largura e espessura de corte. Quanto menor o ângulo de posição, maior a dimensão de contacto e melhor a distribuição de calor com essa mesma extensão. Este facto possibilita o aumento de vida da ferramenta, com um conseqüente agravamento na qualidade do acabamento superficial. O

ângulo de ponta da ferramenta relaciona-se com o ângulo de posição da aresta principal e secundária. Devendo este ser tanto maior quanto possível, favorecendo assim a resistência mecânica da ponta da ferramenta.

O ângulo de ataque da ferramenta consiste no ângulo entre a face de ataque e o plano de referência, podendo este ser positivo ou negativo. Quanto maior o ângulo de ataque, menor a deformação induzida na apanha, sendo também menor o trabalho necessário ao seu desenvolvimento. Deste modo, para ângulos de ataque reduzidos ou negativos, verifica-se uma maior deformação plástica da apanha, favorecendo a sua fragmentação. Com isto, ocorre um aumento considerável das forças de maquinagem e vibrações no processo de corte, sendo isto prejudicial para o tempo de vida da ferramenta e para a qualidade superficial do produto maquinado (Davim, 2008).

O ângulo de saída é sempre positivo. Por norma, adota valores entre  $2^\circ$  e  $8^\circ$ . Um ângulo de saída inferior a  $2^\circ$  é considerado pequeno e pode produzir grande interferência entre a face de saída principal e a superfície maquinada, originando um desgaste acentuado na ferramenta. Em situações de maior sollicitação pode suceder fratura da própria ferramenta, nomeadamente quando os ângulos de ataque são elevados.

O ângulo de inclinação de aresta é geralmente negativo, de forma que o ponto de contacto inicial da ferramenta com a peça não se faça com a aresta menos tenaz, permitindo deste modo uma maior robustez na ferramenta e no processo de corte. Com um ângulo de inclinação positivo, a apanha formada afasta-se da peça e, com um ângulo de inclinação negativo a apanha flete e atrita sobre a peça.

O ângulo de gume é medido entre a face de ataque e a face de saída. Quanto menor o ângulo formado, maior a facilidade da ferramenta em penetrar e, naturalmente, maior a aptidão para remoção de material. O raio de curvatura da ponta da ferramenta de corte influencia o acabamento superficial, a forma da apanha e a resistência da ferramenta de corte. Um raio de ponta pequeno é ideal para baixas profundidades de corte com redução de vibração com a consequência de redução da resistência da ferramenta. Um raio da ferramenta maior, acarreta a utilização de ferramentas robustas, conquistando grandes avanços e grandes profundidades, garantindo também espessuras médias de apanha reduzidas. Os melhores acabamentos superficiais são garantidos quando são utilizados raios de ponta da ferramenta maiores (Davim, 2008).

## 2.6.2 Materiais

A utilização de um vasto número de ferramentas de corte associado a processos altamente dependentes da maquinagem promove custos elevados em tempos não-produtivos, particularmente na troca de ferramentas desgastadas. Nesse sentido, e associado à necessidade de uma oferta diversificada de ferramentas têm-se assistido a um intenso progresso e desenvolvimento ao nível dos materiais das ferramentas (Davim, 2008).

Atualmente, distinguem-se seis grupos de materiais que podem ser considerados na escolha de uma ferramenta para maquinagem: aços rápidos, ligas fundidas, carbonetos sinterizados, *cermets*, cerâmicos, e materiais ultra-duros. Estes diversos materiais apresentam diferentes aplicabilidades em função das suas características. Na Figura 12 é apresentada a distribuição dos materiais em função da sua tenacidade e dureza. Na Tabela 2 é apresentada uma síntese das propriedades mecânicas dos materiais utilizados nas ferramentas de corte.

O desenvolvimento dos equipamentos, nomeadamente sistemas de aperto de ferramentas (anti-vibratório) e a maior rigidez das máquinas, tem permitido uma utilização de materiais frágeis, como é o caso dos cerâmicos e dos ultra-duros (*CBN* e *PCD*), cada vez mais intensa.

A dureza dos materiais não é sempre constante, podendo as suas condições de trabalho fazer variar algumas das suas propriedades, entre as quais a dureza. Quanto maior a temperatura do material menor será a sua dureza e, conseqüentemente, menor o poder de corte. Como tal é de interesse escolher uma ferramenta cujo material se adequa às suas condições de trabalho (L. Amaral, 2017). A Figura 11 ilustra a variação da dureza de alguns materiais consoante a temperatura.

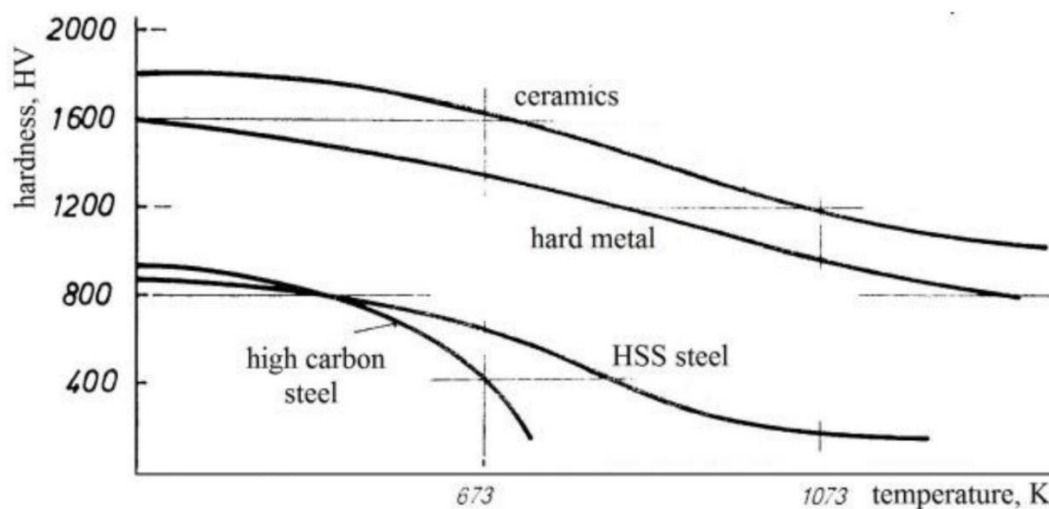


Figura 11 - Dureza de alguns materiais de ferramentas de corte em função da temperatura de trabalho, em Kelvin (Dadić, 2013).

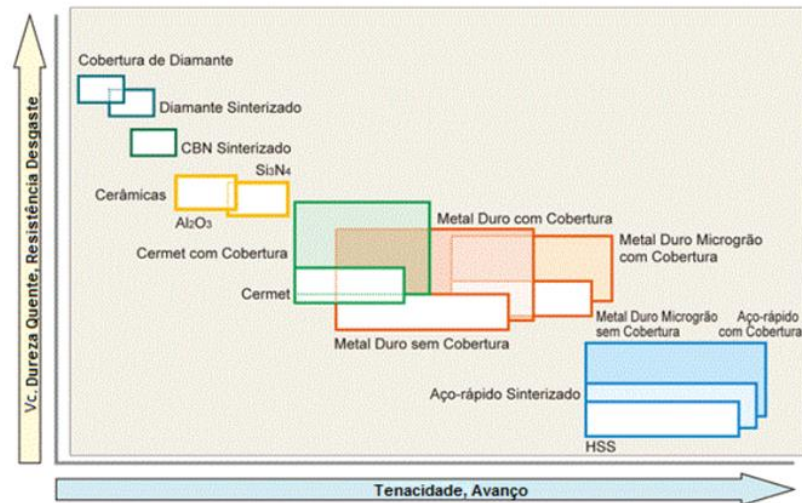


Figura 12 - Distribuição das categorias dos materiais das ferramentas de corte em função da sua dureza e tenacidade (L. Amaral, 2017).

Tabela 2 - Propriedades das categorias de materiais utilizados nas ferramentas de corte (Davim, 2008).

Material	Dureza (HV)	Tensão de rotura transversal (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Coefficiente de dilatação térmica ( $\times 10^{-6}/K$ )	Condutibilidade térmica (W/mK)
<b>Aço rápido</b>	700 – 900	2500 – 4000	260 – 300	9 – 12	15 -48
<b>Carbonetos</b>	1200 – 1800	1300 – 3200	470 – 650	4,6 – 7,5	20 -80
<b>Cerâmicos</b>	1450 – 2100	400 – 800	300 – 450	5,5 – 8	10 -38
<b>Nitreto de Boro Cúbico</b>	3500 – 4000	500 – 800	680	4,9	100
<b>Diamante Policristalino</b>	5000 - 6000	600 - 1100	840	1,5	550

Atualmente, as ferramentas de carbonetos sinterizados são as mais utilizadas, sendo os aços rápidos ainda usados de forma significativa. A utilização de outros materiais em ferramentas é menos expressiva e aplicada, na maioria das vezes, em aplicações especiais.

### 2.6.2.1 Aços rápidos

Os aços rápidos são aços com elevada percentagem de elementos de liga na sua composição cujo objetivo é permitir uma maior dureza a altas temperaturas, necessitando, contudo, de tratamentos térmicos. Os elementos de liga mais comuns nestes aços são: tungsténio; molibdénio; vanádio e crómio, é também possível a adição de cobalto. A alta resistência ao desgaste destes aços deve-se à formação de carbonetos por parte dos elementos de liga adicionados. Estes materiais são usualmente fabricados por processos de metalurgia convencionais, como o forjamento ou por processos de metalurgia dos pós.

Existem mais de quarenta classificações individuais de aços para ferramentas de alta velocidade, segundo (Bayer et al., 1989). Considerando o seu principal elemento de liga, os aços rápidos podem ser subdivididos em duas categorias:

- Grupo M, para aços rápidos ao molibdênio;
- Grupo T, para aços rápidos ao tungstênio;

O tungstênio forma carbonetos complexos com o ferro e o carbono, contribuindo significativamente para a resistência ao desgaste. No entanto, o tungstênio como elemento de liga em aços rápidos, tem vindo a ser cada vez mais substituído pelo molibdênio, dado que este elemento é capaz de formar os mesmos carbonetos duplos e tem metade do peso atômico do tungstênio, podem substituir cada duas partes de tungstênio com uma parte de molibdênio.

Tabela 3 - Composição química e dureza dos aços rápidos do grupo T e M (Davim, 2008).

Qualidades	Composição química (%peso) aproximada						Dureza (HB)
	C	Cr	Mo	W	V	Co	
<b>Grupo T</b>							
T1	0,75	4	-	18	1	-	823
T2	0,8	4	-	18	2	-	823
T4	0,75	4	-	18	1	5	849
T5	0,8	4	-	18	2	8	869
T6	0,8	4,5	-	20	1,5	12	969
T15	1,5	4	-	12	5	5	890
<b>Grupo M</b>							
M1	9,8	4	8	1,5	1	-	823
M2	0,85	4	5	6	2	-	836
M4	11,3	4	4,5	5,5	4	-	849
M15	1,55	4,5	4,1	6,5	5	5	869
M34	0,9	4	8	2	2	8	869
M42	1,1	3,75	9,5	1,5	1,12	8	897

Por análise da Tabela 3, verifica-se que os aços do tipo M apresentam maior tenacidade comparativamente à do tipo T, contudo a sua dureza a quente é mais baixa, podendo ser compensada com adição de mais tungstênio (ASM International, 1998).

O crómio, sempre que presente nos aços, melhora o compromisso entre dureza e tenacidade. As maiores durezas são conseguidas com a adição de cobalto, como é o caso dos aços M35 e M42. Este tipo de aços é indicado para a maquinagem em desbaste a elevada velocidade, devido à sua dureza a quente. Aços rápidos T5, T6 e T15 são caracterizados por uma grande resistência ao desgaste e dureza a quente, sendo que são utilizados para ferramentas de elevado poder de corte. É imperativo o destaque ao aço rápido M2 pela

excelente tenacidade e baixo custo e ao aço rápido M42 pela qualidade apresentado em desgaste elevados (Quinta, 2018).

A tendência destes materiais é a aplicação de revestimentos ou o uso de pastilhas indexáveis de materiais com melhores características, bem como o recurso ao fabrico por metalurgia dos pós, melhorando significativamente as suas propriedades, dada a distribuição mais homogênea e o menor diâmetro dos carbonetos. A sua limitação está associada às velocidades e avanços admissíveis serem bastante inferiores aquelas verificadas para ferramentas em carbonetos sinterizados, implicando um aumento do tempo de maquinagem de um dado produto, e conseqüente diminuição de produtividade.

Os aços rápidos podem ainda ser fabricados recorrendo à pulverometalurgia, permitindo desta forma um maior controlo do seu resultado final. Enquanto os métodos convencionais geram heterogeneidade na estrutura e composição química, este método permite distribuir os carbonetos de 50 a 500  $\mu m$  de uma forma aproximadamente homogênea. Esta mesma homogeneidade confere uma maior tenacidade ao material (Davim, 2008).

Concluindo, os aços rápidos apresentam um ótimo compromisso entre tenacidade e resistência ao desgaste e mantêm a dureza até aos 400 °C (50-65 HRC). São os de mais baixo custo, apresentado, no entanto, menor tempo de vida em trabalho.

#### 2.6.2.2 Carbonetos Sinterizados ou Metal Duro (HM)

Atualmente, na indústria, as ferramentas em carbonetos sinterizados apresentam uma utilização muito significativa e tal é devido à sua dureza, tanto a frio como a quente, à sua tenacidade e resistência ao desgaste. Este tipo de material é, também, frequentemente denominado de “metal duro”. Estas características podem ser obtidas em função das matérias base da ferramenta, uma vez que são formadas por dois constituintes:

Carboneto – elemento que confere a elevada dureza e resistência ao desgaste, frequentemente o carboneto de Tungsténio ( $WC$ ) que pode aparecer só ou acompanhado de elementos como carboneto de vanádio ( $V_4C_3$ ), carboneto de nióbio ( $NbC$ ) e o carboneto de tântalo ( $TaC$ ). O tamanho dos grãos varia entre 0,5 e 5  $\mu m$ , influenciando a dureza do material conforme a o diâmetro dos mesmos, aumentando com a diminuição do diâmetro do grão.

Aglomerante – o elemento aglomerante tem como função ligar as partículas duras, sendo o elemento de maior destaque o cobalto, este apresenta composições entre 3 e 12%, dependendo do tipo de material duro. A sua percentagem tem influência direta na tenacidade do produto final, sendo tanto maior, quanto maior a percentagem do elemento. Contudo, um aumento da percentagem de cobalto presente na composição provoca uma diminuição da dureza do material.

Segundo a norma *ISO 513 (International Organization for Standardization)* os carbonetos sinterizados podem ser classificados de acordo com os grupos apresentados na Tabela 4 (Homem Coimbra, 2014; International Standard, 2012)

Tabela 4 - Classificação dos carbonetos sinterizados (Quinta, 2018).

<b>Grupo</b>	<b>Materiais a maquirar</b>	<b>Apara gerada</b>
P	Materiais ferrosos	Longas e dúcteis
M	Materiais ferrosos	Longas ou curtas
K	Ferro fundido, ligas de alumínio, materiais não metálicos	Fragmentadas
N	Alumínio, latão, cobre	-
S	Superligas de níquel, cobalto e titânio	-
H	Materiais de alta dureza (aços endurecidos)	-

Na Tabela 5 são apresentadas as propriedades mecânicas relevantes destes materiais.

Tabela 5 - Composição química e propriedades para metais duros (Davim, 2008).  
Composição química aproximada

	<i>WC</i>	<i>TiC + TaC</i>	<i>Co</i>	<b>Dureza (HV)</b>	<b>Tensão de rotura transversal (MPa)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>
<b>P01</b>	30	64	6	1500	750	-
<b>P10</b>	55	36	9	1600	1400	520
<b>P20</b>	76	14	10	1500	1500	540
<b>P25</b>	73	19	8	1500	1700	550
<b>P30</b>	82	8	10	1450	1700	560
<b>P40</b>	77	12	11	1400	1800	560
<b>P50</b>	70	14	16	1300	2000	520
<b>M10</b>	84	10	6	1650	1400	580
<b>M20</b>	82	10	8	1550	1600	560
<b>M30</b>	81	10	9	1450	1800	580
<b>M40</b>	78	7	15	1300	2000	550
<b>K01</b>	93	2	5	1750	1200	630
<b>K05</b>	92	2	6	1700	1350	630
<b>K10</b>	92	2	6	1650	1500	630
<b>K20</b>	91,5	2,5	6	1550	1700	620
<b>K30</b>	89	2	9	1450	1900	-
<b>K40</b>	88	-	12	1300	2100	580

As propriedades mecânicas do metal duro: resistência ao desgaste, dureza, tenacidade, entre outros, são função da composição química do material como representado na Figura 13 (% carbonetos *vs* % aglomerante) bem como do tamanho do grão, representado na Figura 14, da temperatura e outros parâmetros do processo de sinterização dos pós.

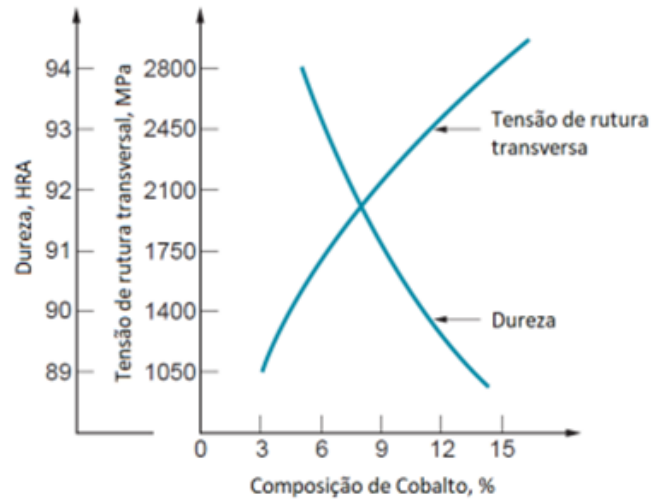


Figura 13 - Propriedades mecânicas do metal duro em função da percentagem de cobalto (L. Amaral, 2017).

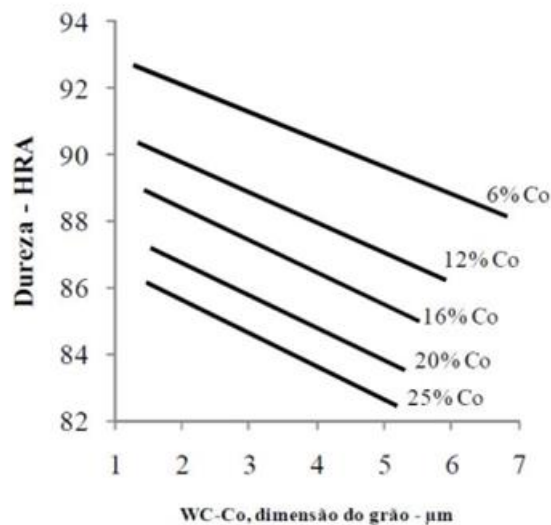


Figura 14 - Influência do tamanho de grão e percentagem de cobalto na dureza do carboneto sinterizado (de Oliveira Guimarães, 2009).

Para além do carboneto de tungstênio, existe a utilização de outros carbonetos, que conferem propriedades distintas. Na

Tabela 6 resume-se as propriedades mecânicas mais importantes de alguns desses carbonetos e na Figura 15 apresenta-se a evolução da dureza com a temperatura dos diferentes carbonetos (Davim, 2008; Mikell P. Groover, 2020).

Tabela 6 - Propriedades mecânicas de determinados carbonetos (L. Amaral, 2017).

Material	Dureza (HV)	Módulo Young (GPa)	Coef. Expansão térmica ( $\times 10^{-6}/K$ )	Tenacidade ( $MPa \cdot m^{0.5}$ )	Cond. Térmica ( $W/mK$ )
WC	3100-3600	600-670	4.5-7.1	7.4-9	28-32
TiC	2500-3200	420-450	6.6-7.4	2.3-2.8	18-25
ZrC	2380-2630	346-430	6.6-6.8	2-3	21-25
NbC	2280-2520	320-340	6.6-7.4	2-3	14-33
TaC	1300-2400	360-375	6.6-7.4	2-3	20-22

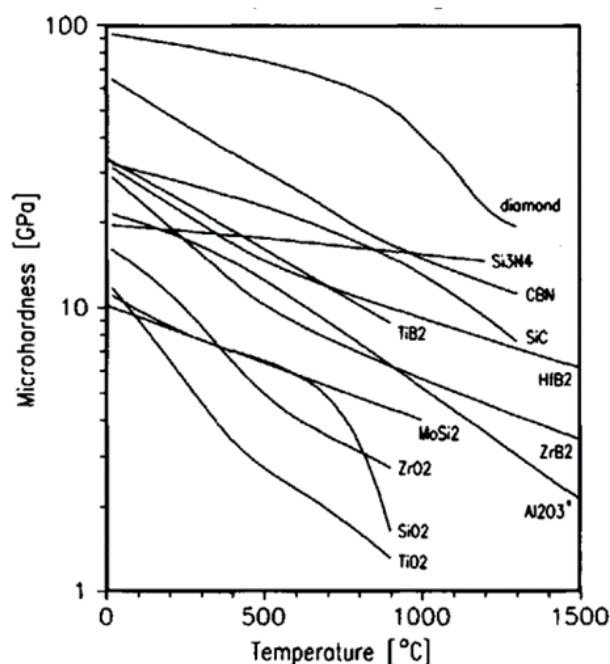


Figura 15 - Dureza de diferentes carbonetos em função da temperatura (Boisse et al., 2003).

### 2.6.2.3 Cermets

Os *Cermets* são materiais agregados de cerâmica numa matriz metálica, daí resulta a designação: cerâmico e metais. A sua estrutura parte da adição de agregados cerâmicos, sob a forma de carbonetos ( $TiC$ ,  $TiN$  ou  $TiCN$ ), a uma matriz metálica de cobalto, níquel ou molibdénio.

As principais características deste material correspondem à grande estabilidade química, a sua alta dureza a quente e a baixa tendência ao desgaste por oxidação. Atualmente, a maioria dos inserts para ferramentas de corte são fabricados a partir de carbonetos sinterizados revestidos com cerâmicos.

Os *Cermets* são capazes de trabalhar a elevadas velocidades de corte, o que permite alcançar um melhor acabamento superficial, pelo que acabam por ser vantajosos em operações de

acabamento e semiacabamento. São excelentes para aplicações onde as tolerâncias sejam muito apertadas e haja necessidade de uma elevada qualidade superficial e de estabilidade dimensional (Pinho de Jesus, 2015).

#### 2.6.2.4 Carbonetos Sinterizados Revestidos

Este tipo de material apresenta semelhanças com os carbonetos sinterizados, diferindo apenas na aplicação superficial de revestimento. O revestimento é aplicado com o intuito de conferir dureza superficial, com conseqüente aumento da resistência ao desgaste e redução da aresta postiça e da propagação de fissuras. Os revestimentos possuem ainda um baixo coeficiente de atrito, baixa condutividade térmica e superfícies quimicamente inertes, que permitem a redução dos efeitos de adesão, abrasão, oxidação e difusão. A aplicação de revestimentos nas ferramentas não compromete as propriedades mecânicas.

#### 2.6.2.5 Cerâmicos

A grande vantagem das ferramentas em materiais cerâmicos, em relação às ferramentas metálicas e de carbonetos, é a sua capacidade de suportar temperaturas muito elevadas, apresentando ainda excelente dureza e boa condutividade térmica. As maiores desvantagens são a sua fragilidade e fraca resistência ao choque térmico, sendo por isso usados em processos contínuos e de longo prazo.

Os materiais mais comuns são a alumina ( $Al_2O_3$ ), o nitreto de silício ( $Si_3N_4$ ), SIALON ( $SiN - Al_2O_3$ ). Nesta classe de materiais é usual encontrarem-se cerâmicos reforçados com fibras de carboneto de silício, também designados de *whiskers* (Davim, 2008).

Na Tabela 7, é possível observar as propriedades dos cerâmicos (G.D. Limited, 2013).

Tabela 7 - Propriedades dos cerâmicos (G.D. Limited, 2013; Quinta, 2018).

Material	Dureza (HV)	Cond. Térmica ( $\times 10^6 W/mK$ )	Coef. Expansão térmica ( $W/mK$ )	Tenacidade ( $MPa\sqrt{m}$ )
Alumina	1860 – 2160	16,9-29,1	6,2-6,4	4,3
Nitreto de silício	1520 – 1680	14,4-15,6	3,3	5
SIALON	1650 – 1890	18-23	3,5	5,1
Fibras de SiC	120 -150	115-140	17	19

Por análise à tabela acima, constata-se que estes materiais são normalmente usados para maquinagem de superligas resistentes ao calor, principalmente para a indústria aeroespacial, como os aços duros, titânio e ferro fundido. Este tipo de material utiliza-se

sobretudo em operações de acabamento em fresagem e maquinagem em ambientes quimicamente reativos (Pinho de Jesus, 2015).

#### 2.6.2.6 *Ultraduros*

Os materiais ultraduros utilizados no fabrico de ferramentas são o nitreto de Boro cúbico (*CBN*) e o diamante policristalino (*PCD*). A sua extrema dureza justifica o custo destes materiais, sendo o mesmo extremamente elevado, tendo um custo até cerca de 30 vezes superior ao dos insertos de carbonetos.

*CBN* – Nitreto de boro cúbico: o nitreto de boro cúbico é resultado da compactação a altas pressões (8 *GPa*) e temperaturas (1500 °C) de grãos finos de nitreto de boro e um material metálico, que corresponde ao aglomerante. O material pode ser fornecido sobre a forma de inserto ou como revestimento do substrato de carbonetos. Trata-se de um material que, além de ser extremamente duro, apresenta vantagens como elevada condutividade térmica que permite um fácil escoamento do calor do processo através da ferramenta, baixa afinidade com os aços a elevadas temperaturas e elevada estabilidade química.

O material é empregue na maquinagem de materiais com elevadas durezas, essencialmente superligas de níquel e aços de elevada dureza, utilizando rotações elevadas.

*PCD* – Diamante policristalino

Neste tipo de ferramentas é utilizado o material mais duro, o diamante. Este foi introduzido no mercado no início da década de 80, tendo revolucionado o processo de fabrico de ferramentas de corte.

As excelentes características deste material resultam da aplicação de uma fina camada de diamante de espessura variável entre 0,5 e 1 *mm*, composta por partículas entre os 10 e os 40  $\mu\text{m}$ . A aproximadamente 1500°C e a uma pressão aproximada de 60 *kbar*, através de um processo de sinterização, verifica-se a junção de diamante sintético a um substrato de metal duro (geralmente cobalto). Age como um catalisador e causa uma intensa alteração estrutural nas partículas individuais do diamante, dando origem a um material de corte com as propriedades combinadas do metal duro e do diamante.

As características das peças em *PCD* são influenciadas por diversos fatores como os tamanhos de grãos na microestrutura dos diamantes e espessuras do substrato, de tal forma que são registadas durezas com valores muito superiores àquelas que são verificadas para os carbonetos sinterizados. Verifica-se a existência de uma relação inversa entre resistência ao desgaste e dureza e tenacidade da ferramenta. Desta forma, as ferramentas de *PCD*, contendo partículas de diamantes mais grosseiras são mais resistentes ao desgaste, contudo são menos tenazes. Por outro lado, ferramentas de *PCD* com partículas de diamantes de

dimensões inferiores são tenazes, apresentando uma resistência ao desgaste mais baixa (Dundas, 2001; Quinta, 2018).

Deste modo, dependendo da funcionalidade, pode ser feito um ajuste destas características das ferramentas em função do material do substrato ou tamanho das partículas de diamante, obtendo a melhor relação possível preço/qualidade. Contudo, é necessário ter em conta o facto de que nos materiais onde se verifique a geração de grande quantidade de calor na interface apara-ferramenta, deve-se evitar a utilização de *PCD*, uma vez que o diamante tende a transformar-se em grafite. Desta forma, a sua utilização é limitada maioritariamente a ligas de alumínio e a materiais extremamente abrasivos.

Tendo em conta as características do *PCD*, torna-se difícil proceder à sua maquinagem, de modo a conferir-lhe a geometria pretendida. Assim, uma vez que os métodos de retificação tradicionais não eram adequados, novos métodos foram desenvolvidos e refinados até às soluções presentes no mercado, capazes de fornecer excelentes resultados. A retificação com partículas de diamante, eletroerosão por fio e a tecnologia de corte por laser agora são processos habituais na maquinagem destes materiais. A grande vantagem da maquinagem por eletroerosão por fio é a capacidade de cortar qualquer material, independentemente da sua dureza, deste que este seja condutor de eletricidade, o que no caso das ferramentas em *PCD* é assegurada pelo elemento ligante do substrato, geralmente cobalto. A operação de retificação confere um melhor acabamento superficial às faces expostas. Existe a possibilidade de combinar dois processos um único disco de retificação, onde o disco de diamante retifica a peça e um anel de grafite, à volta do disco, serve como ferramenta para a eletroerosão. No entanto, devido à natureza dos cristais de *PCD*, as ferramentas para eletroerosão e retificação têm tendência a passar à volta ou arrancar completamente certas partículas, em vez de as cortar, o que causa alterações na rugosidade da aresta de corte, podendo também criar lascas microscópicas nesta e, eventualmente, lascas macroscópicas. Levando a um conseqüente decréscimo do desempenho da ferramenta em termos de acabamento superficial, reduzindo também a vida desta (Dundas, 2001; MoldMaking Technology, 2017).

No caso da retificação, os diamantes são completamente arrancados, sendo o raio da aresta de corte limitado pelo desgaste do disco de retificação. Já a eletroerosão afeta apenas o elemento ligante, uma vez que o diamante não é o condutor de eletricidade. Ou seja, as partículas de diamante são soltas pela remoção do ligante, sendo o raio da aresta de corte limitado pelo diâmetro do fio. Vários estudos têm sido feitos com o objetivo de melhor compreender a qualidade dos insertos em *PCD* fabricados por maquinagem a laser, sendo de notar que os tempos de processamento para insertos em *PCD* fabricados por maquinagem a laser são geralmente menores que os fabricados por retificação ou

eletroerosão. O uso de laser para maquinagem das ferramentas em *PCD* é uma alternativa muito competitiva, uma vez que este facilmente evapora a camada de diamante e corta o substrato, produzindo uma aresta de corte muito afiada sem lascas ou protuberâncias dos cristais de diamante, com raios entre os 2 e 3  $\mu m$ , e raios interiores de pelo menos 15 micrómetros. O facto de a aresta de corte ser mais afiada aumenta a vida da ferramenta, além de assegurar um melhoramento da qualidade superficial da peça maquinada.

Tabela 8 - Propriedades mecânicas dos materiais ultraduros (Davim, 2008; Homem Coimbras, 2014; Shin et al., 2004).

<b>Material</b>	<b><i>PCD</i></b>	<b><i>CBN</i></b>
<b>Dureza a 25 °C (<i>HV</i>)</b>	5000-6000	3500-4000
<b>Condutividade térmica (<i>W/mK</i>)</b>	550	100
<b>Módulo Young (<i>GPa</i>)</b>	840	680
<b>Coef. Expansão térmica (<math>\times 10^{-6}/K</math>)</b>	1.5	4.9

### 2.6.3 Vida das ferramentas

A vida da ferramenta é compreendida como o tempo que a mesma trabalha efetivamente até à perda da sua capacidade de corte. A verificação do efeito de desgaste suportado pelas ferramentas é realizada através da análise da rugosidade superficial e precisão dimensional dos componentes maquinados, das forças e potências de corte e o tipo de apara formada.

Para uma caracterização completa do tempo de vida das ferramentas é essencial conhecer onde as falhas ocorrem (Figura 20), o tipo de falhas existentes (Figura 19) e a causa das mesmas.

Fundamentalmente as falhas nas ferramentas sucedem em dois locais: no flanco ou na face de ataque, como passível de observar na Figura 20. As falhas típicas equivalem à fratura da ferramenta, em consequência de esforços de corte elevados para a ferramenta em questão ou heterogeneidades no material; amaciamento do material, devido à falta de lubrificação e/ou desajustes nos parâmetros de corte que provoca perdas no poder de corte da ferramenta por aquecimento excessivo; desgaste normal devido à utilização da mesma que provoca a diminuição progressiva do poder de corte e/ou perda progressiva da aresta de corte (Davim, 2008; Mikell P. Groover, 2020).

A causa do desgaste, originado pela interação ferramenta-material, deve-se a fenómenos como:

- Abrasão: corresponde à erosão de pequenas partículas na ferramenta, consequência do contacto com carbonetos ou outros compostos duros na peça e com a apara;

- Adesão: assimilada como soldadura, advém das elevadas temperaturas e/ou pressões que por vezes ocorrem na interface ferramenta-peça, dependentes também do material a maquinar;
- Difusão: equivale à transferência de átomos entre os materiais intervenientes ao processo. Esta permutação remove frequentemente os elementos que conferem dureza à ferramenta;
- Deformação plástica: a ocorrência de altas temperaturas pode originar a plastificação da aresta de corte e maior suscetibilidade à abrasão;
- Oxidação: equivale à formação de uma camada de óxidos na superfície da ferramenta com conseqüente perda de poder de corte.

O desgaste das ferramentas de corte, está inerentemente relacionado com o material que compõe as mesmas (Vaghefpour et al., 2015), como ilustrado na Figura 16, comparando o tempo de vida de vários materiais de ferramentas. Os aços rápidos são a categoria de materiais com o tempo de vida mais curto. Os carbonetos revestidos e os cerâmicos representam a gama de materiais para ferramentas de corte com o maior tempo de vida, tendo em conta as suas propriedades.

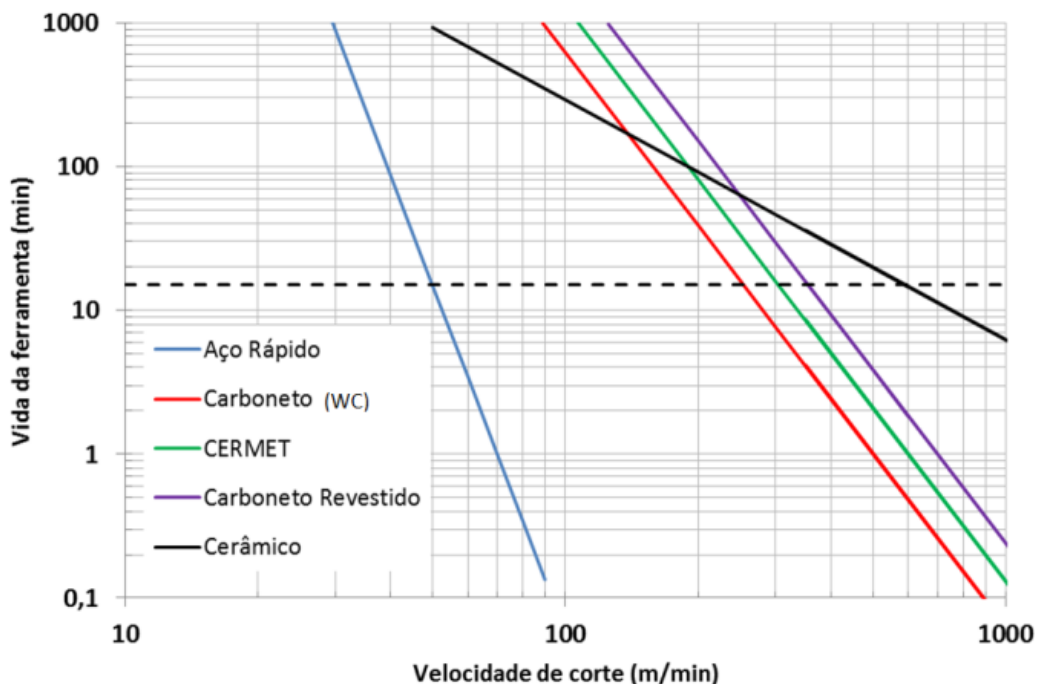


Figura 16 - Resistência ao desgaste e tempo de vida dos materiais (L. Amaral, 2017).

O desgaste da ferramenta é inevitável, por isso é aconselhável uma degradação controlada da ferramenta, sendo assim possível substituir a ferramenta, alcançando melhores resultados no que diz respeito à economia de maquinagem.

Uma escolha criteriosa do material da ferramenta, apresenta uma fixação da vida útil da ferramenta por parte do desgaste da face de saída. Para além do material das ferramentas, a utilização de parâmetros de corte adequados ao processo minimiza também o desgaste da ferramenta. Os gráficos da Figura 17 e Figura 18 revelam a variação da vida útil da ferramenta de corte em função dos diferentes parâmetros de corte (Davim, 2008).

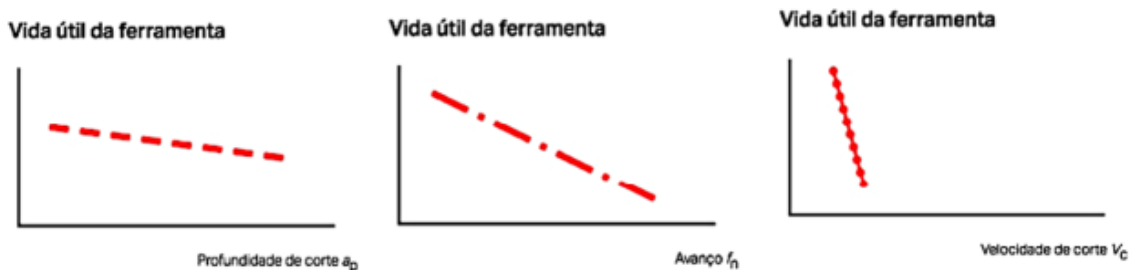


Figura 17 - Influência dos parâmetros de corte ao longo da vida da ferramenta de corte (Quinta, 2018).

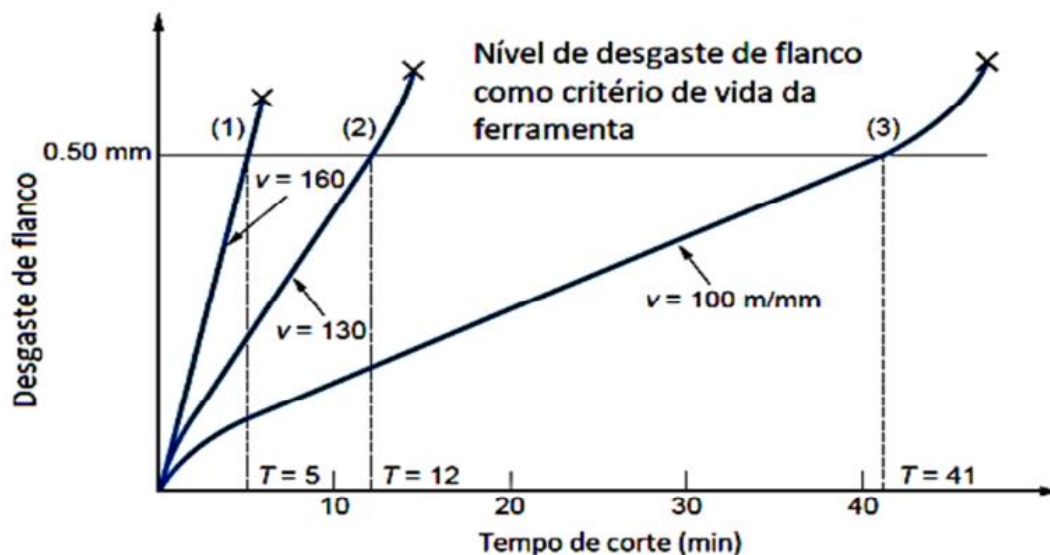


Figura 18 - Desgaste da ferramenta de corte em função dos parâmetros de corte (Pinho de Jesus, 2015).

A análise de desgaste da ferramenta pode ser realizada a partir de métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos baseiam-se na perda de material por parte da ferramenta de corte são consideradas técnicas óticas, apalpadores e resistências elétricas. Os métodos indiretos empregam parâmetros relacionados com o desgaste da ferramenta como a forma de controlo e análises às variações dimensionais da peça, variação das potências de maquinagem, variação da acústica ou temperatura (Davim, 2008).

### 2.6.3.1 Mecanismos de desgaste

Apresentado a importância da análise do desgaste da ferramenta, é necessário apresentar a análise de mecanismos de desgaste. De seguida apresenta-se na Figura 19 um gráfico com os mecanismos de desgaste em função dos parâmetros de corte e da temperatura de corte.

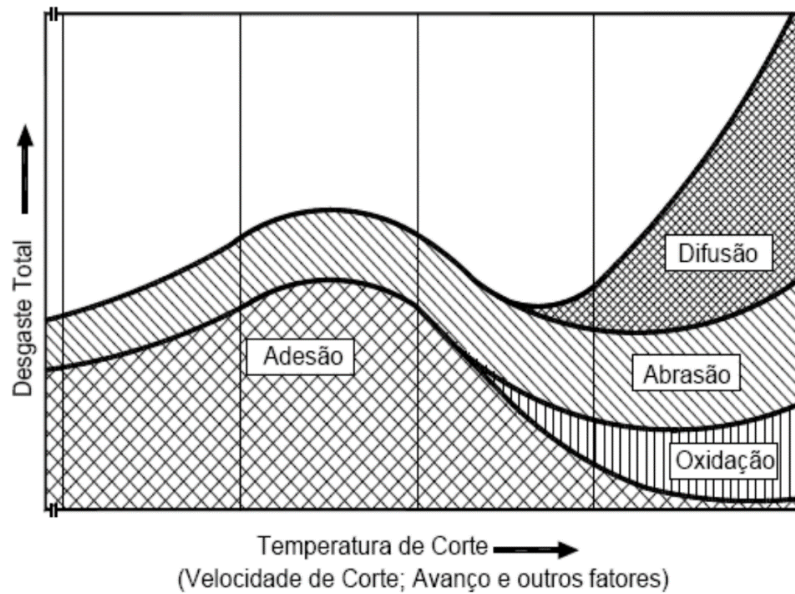


Figura 19 - Mecanismos de desgaste em função dos parâmetros de corte e da temperatura de corte (Pinho de Jesus, 2015).

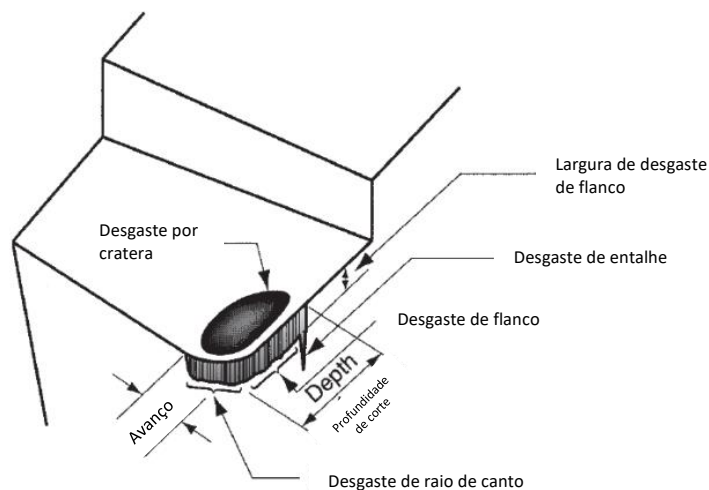


Figura 20 - Zonas de desgaste em uma ferramenta monofilar (Mikell P. Groover, 2020).

O processo de desgaste por abrasão ocorre devido à presença de partículas duras entre as superfícies de deslizamento. A adesão (ou soldadura) verifica-se entre o material a maquinar e a ferramenta de corte quando há afinidade entre os materiais, sendo influenciada por fatores como a temperatura, o tempo e a pressão de contacto. A difusão consiste na transferência de átomos pertencentes à rede cristalina de um material para a rede cristalina de outro material. Quanto maior for a afinidade entre materiais e temperatura de contacto, maior a difusão e maior a remoção dos elementos da ferramenta que lhe conferem dureza. A oxidação, consiste na formação de uma camada de óxidos na superfície da ferramenta com consequente perda de poder de corte, resultado do elevado aquecimento da ferramenta e da composição do meio, ocorrendo apenas com a presença de oxigénio na região aquecida (Davim, 2008; Kratochvil, 2004).

### 2.6.3.2 Tipos de desgastes e falhas

Tendo em consideração a extrema importância da análise de uma ferramenta para reconhecer a sua capacidade em realizar remoção de material, são apresentados na Tabela 9 os tipos de desgaste e falhas, apresentado também alguns dos motivos que proporcionam a sua origem e o modo como podem ser solucionados (Jung et al., 2002; Mikell P. Groover, 2020).

Tabela 9 - Tipos de desgaste nas ferramentas de corte, causa e solução (Davim, 2008; Kratochvil, 2004; Pantazopoulos, 2003; Sandvik Coromant, n.d.).

<b>Tipo de desgaste</b>	<b>Causa</b>	<b>Solução</b>
<b>Desgaste de flanco</b> 	Velocidades de corte elevadas Ferramenta com baixa resistência ao desgaste Refrigeração insuficiente	Diminuição da velocidade de corte Escolha de material apropriado para a maquinagem a realizar. Melhoria de refrigeração
<b>Desgaste tipo entalhe</b> 	Ângulo de ataque negativo	Escolha de material apropriado para a maquinagem a realizar. Alteração da profundidade de corte.
<b>Craterização</b> 	Velocidade de corte e/ou avanço elevados. Material tenaz na ferramenta de corte	Diminuição da velocidade de corte e/ou avanço. Escolha de ferramenta com maior resistência ao desgaste. Utilização na geometria da ferramenta um quebra-apara
<b>Deformação plástica</b> 	Elevadas pressões de corte Elevadas temperaturas de corte Refrigeração insuficiente	Diminuição dos parâmetros de corte. Alteração do material da ferramenta. Melhoria da refrigeração
<b>Aresta postiça (BUE)</b> 	Temperaturas de corte baixas Solda de apara sobre a ferramenta Ângulo de ataque muito baixo ou negativo	Aumento dos parâmetros de corte Alteração do ângulo de ataque da ferramenta
<b>Lascamento na aresta</b> 	Condições instáveis com vibração máquina/ferramenta	Garantir estabilidade no processo de corte Escolha de ferramenta de corte mais tenaz e robusta
<b>Fissuras térmicas</b> 	Variação de temperaturas no processo de corte Refrigeração e cortes intermitentes	Redução das velocidades de corte Aplicação eficiente de refrigeração

### 2.6.3.3 Lei de Taylor

Como assimilado anteriormente, o tempo de vida de uma ferramenta é variável e dependente de vários fatores, correspondendo ao tempo de corte ou de trabalho durante o qual, o resultado da sua utilização é o pretendido para o objeto a maquinar.

De entre vários critérios empregues para a determinação da vida de uma ferramenta destacam-se dois: um deles baseia-se na observação do desgaste da ferramenta, considerando-se elevado procede-se à substituição da mesma; o outro critério define-se pelo tempo de vida necessário para a fratura de uma ou mais arestas de corte. A determinação da vida da ferramenta é efetuada recorrendo a ensaios de maquinagem controlada (Davim, 2008; Pinho de Jesus, 2015).

Como é possível verificar na Figura 18, a diferentes velocidades correspondem diferentes taxas de desgaste e, conseqüentemente tempos de vida distintos. De salientar também que, quanto maior for a velocidade, menor será o tempo de vida da ferramenta. As curvas, representadas a azul na Figura 18, demonstram igualmente uma taxa de desgaste inicial mais elevada após a qual, a taxa de desgaste mantém um crescimento estável (L. Amaral, 2017; Mikell P. Groover, 2020).

Apesar de o desgaste ser mais acentuado em velocidades de corte mais elevadas na prática é feito um balanceamento entre o desgaste das ferramentas e as taxas de produção, optando-se sempre pela solução mais económica (Mikell P. Groover, 2020).

O gráfico da Figura 21 ilustra a relação entre a velocidade de corte e o tempo de vida de uma ferramenta, também conhecida como Lei de Taylor.

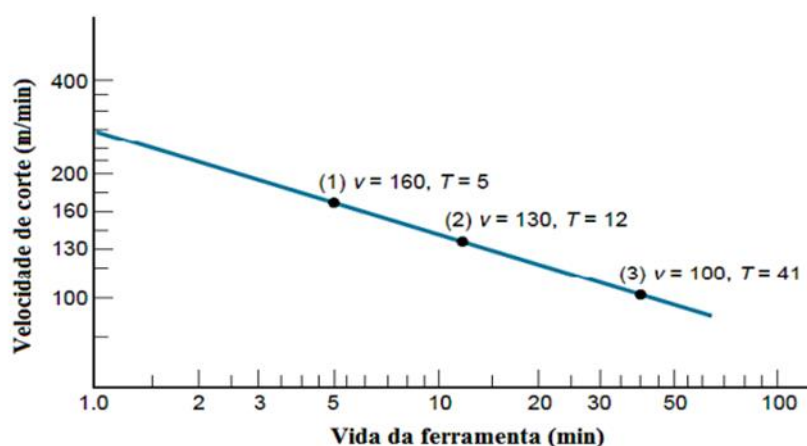


Figura 21 - Lei de Taylor, relação da vida da ferramenta com a velocidade de corte (Pinho de Jesus, 2015).

Taylor propôs uma equação empírica, traduzindo a relação entre a velocidade de corte  $V_c$  e o tempo de vida da ferramenta  $T$ , em que  $n$  e  $C$  são constantes dependentes do critério de

falha adotado, do material da peça e da ferramenta. Esta lei pode ser expressa matematicamente por (Pinho de Jesus, 2015):

$$V_C \cdot T^n = C \quad [9]$$

A equação apresenta é simplificada, uma vez que não considera fatores que influenciam a vida das ferramentas como a dureza do material a maquinar, avanço e profundidade de corte. Desta forma, são introduzidos novos parâmetros na equação de modo a retificar as simplificações ponderadas, obtendo-se assim a seguinte equação (L. Amaral, 2017; Davim, 2008; Pinho de Jesus, 2015; Quinta, 2018):

$$V_C \cdot T^n \cdot f_n^m \cdot a_p^p = K \cdot T_{ref}^n \cdot f_{nref}^m \cdot a_{pref}^p \quad [10]$$

Os parâmetros apresentados no índice *ref* dizem respeito a valores de referência, enquanto os expoentes *m* e *p* são valores determinados experimentalmente e *K* é uma constante. De salientar que, nesta equação, não está implícita a contribuição da dureza do material, nem da refrigeração utilizada, contudo estes são de extrema importância no processo.

#### **2.6.4 Revestimentos**

O revestimento de uma ferramenta de corte constitui uma camada protetora superficial quer em ferramentas de corte, quer em elementos mecânicos. A sua utilização tem o intuito de fornecer à ferramenta resistência ao desgaste, através de uma grande dureza superficial, ao mesmo tempo que preserva a tenacidade do substrato.

Para além de diminuir o desgaste da ferramenta, este tipo de tratamento também aprimora a qualidade do material maquinado, inibe reações químicas entre o substrato e o material e reduz a quantidade de lubrificante utilizado no processo visto que ocorre diminuição do coeficiente de atrito. Esta diminuição também tem como consequência a diminuição das forças de maquinagem envolvidas. O revestimento funciona também como isolante térmico, estabelecendo uma transferência do calor resultante para a limalha, contrariamente à transmissão que ocorre para a própria ferramenta sem a aplicação de revestimento. A redução de calor, produzido entre a ferramenta e o material, permite potencializar a eficiência do processo.

A aplicação de revestimento garante um aumento da vida da ferramenta, assim como o aumento das gamas de velocidades de corte. Este método é utilizado essencialmente em carbonetos sinterizados, podem também ser aplicados em aços rápidos, *cermets* e cerâmicos. Materiais apresentados mais adiante nesta dissertação.

Atualmente, disponível no mercado encontram-se diversas soluções de revestimento de ferramentas a partir de diversos materiais. Dentro deles, é importante salientar:

*TiCN* (Carboneto de titânio) – Caracteriza-se pelas boas propriedades de adesão e necessidade lubrificação baixa. Contudo, carece de uma camada resistente ao calor para combater o sobreaquecimento. O *TiCN* é aplicado em materiais difíceis de maquinar: como aços rápidos, aços de dureza superior a 40 *HRC* e materiais abrasivos e adesivos.

$Al_2O_3$  (Óxido de alumínio) – Elevada dureza, boa resistência ao desgaste, quimicamente inerte e baixa condutividade térmica. Estas características permitem que este material seja resistente à formação de crateras.

*AlCrN* (Nitreto de alumínio-crómio) – Apresenta elevada resistência ao desgaste, baixo coeficiente de atrito e dureza a altas temperaturas.

*AlTiN* (Nitreto de alumínio-titânio) – Adequado para aplicações que envolvem altas temperaturas, apresenta grande dureza a quente, ductilidade e baixo

*CrN* (Nitreto de cromo) – Boa combinação de resistência ao desgaste abrasivo, corrosão e oxidação, baixo coeficiente de atrito, boa tenacidade e boa ductilidade.

*PCD* – Elevada dureza e resistência ao desgaste, porém apresenta alguma difusão química em materiais com carbono.

*TaC* (Carboneto de Tântalo) – Empregue em carbonetos sinterizados com a vantagem de conferir dureza a quente, resistência ao desgaste e resistência química.

*NbC* (Carboneto de Níbio) – Aplicado em carbonetos sinterizados com a vantagem de conferir dureza a quente, resistência ao desgaste e resistência química.

*TiAlN* (Nitreto de alumínio-titânio) – idêntico ao revestimento *AlTiN*, com uma dureza tenuemente inferior, possui, no entanto, uma dureza superior em combinação com resistência à oxidação, melhorando a resistência geral ao desgaste.

*TiB<sub>2</sub>* – Possui fraca microestrutura e grande porosidade, utilizado com outros compostos tais como *TiC* de modo a melhorar as suas propriedades.

*TiC* – Apresenta boa resistência ao desgaste, elevada dureza, e boa estabilidade química sendo aplicado em carbonetos sinterizados.

*TiHfCN* – Propriedades semelhantes aos revestimentos de *TiN* e *TiC*, tendo, no entanto, um maior ponto de fusão e conseqüente melhor estabilidade térmica e resistência ao desgaste, com baixa difusividade térmica;

*TiN* – Utilização universal, material com uma dureza inferior aos restantes, mas com coeficiente de atrito relativamente baixo, diminuindo crateras de desgaste;

*TiSi* – Composto de elevada dureza e alto coeficiente de atrito, entre 0,75 e 0,8;

*ZrN* – Semelhante ao revestimento *TiN* possuindo, no entanto, maior poder lubrificante, reduz o desgaste abrasivo e é quimicamente resistente.

Diamante – Elevada dureza, elevada resistência ao desgaste, difusão térmica com materiais que contenham carbono, pouca adesão ao substrato. Este tipo de revestimento é aplicado na maquinação de cobre, latão, titânio e suas ligas.

As estruturas de revestimentos podem ser aplicadas sob a forma de monocamada, multicamada ou laminar. A existência de diferentes tipos de camadas ocorre pela necessidade de combinar as melhores propriedades dos diversos tipos de revestimentos, que são dependentes também da ferramenta, do material a maquinar e do tipo de maquinagem. A espessura do revestimento aplicado deve estar compreendida entre 1 e 10  $\mu m$ , não devendo ultrapassar este último. Um valor superior a 10  $\mu m$  tem como consequência o aumento da fragilidade, apesar de ocorrer ao mesmo tempo um aumento da resistência ao desgaste. O aumento da temperatura de deposição origina uma maior espessura de revestimento e, naturalmente, maior compactação do filme, aumentando assim a dureza. Um único material não consegue melhorar todos os tipos de resistência ao desgaste na ferramenta, desta forma existem materiais mais adequados consoante o tipo de aplicação.

De seguida, na Figura 22, é apresentada uma comparação entre a resistência ao desgaste por cratera por parte dos materiais utilizados como revestimentos.

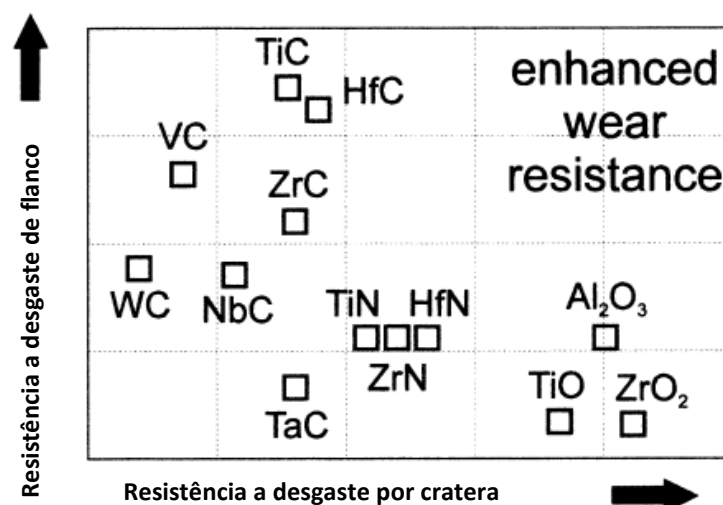


Figura 22 - Comparação resistência ao desgaste, por cratera, consoante o material utilizado como revestimento (Lugscheider et al., 1999).

No que diz respeito às metodologias utilizadas para a aplicação dos revestimentos, podem encontrar-se tecnologias como o *PVD*, *CVD*, *PACVD* e *FCVA*.

O *PVD* (*Physical Vapour Deposition*) é um processo de revestimento por vácuo que dá origem a uma fina camada cerâmica de elevada aderência. O processo decorre a temperaturas moderadas (400-600 °C). O material metálico a depositar é removido de uma fonte por evaporação, recorrendo a um arco elétrico de elevada potência, reagindo com um gás ativo como nitrogénio, oxigénio ou um hidrocarboneto, formando uma película dura sobre a superfície da ferramenta. Os revestimentos mais usados por este processo são *TiC*, *TiN*, *TiCN* (Arceo Engineering, n.d.; Quinta, 2018; Thin Film Advanced Technologies, n.d.).

O *CVD* (*Chemical Vapour Deposition*) é um processo onde se verifica a deposição a partir de reações químicas, que sucedem na ordem dos 700-1500 °C, envolvendo gases precursores com os elementos químicos que compõem o material a ser depositado. Estas partículas afetam o substrato a partir de um movimento aleatório, gerido por processos de difusão e/ou convecção de matéria. Uma das grandes vantagens desta técnica corresponde à capacidade de aumentar a velocidade de corte, sendo adequados a aplicações severas com altos avanços e velocidades de corte moderadas a elevadas. A gama de temperaturas acaba por limitar os tipos de materiais que podem ser revestidos. Os revestimentos mais usados por este processo são: *TiC*, *TiN*, *TiCN* e  $Al_2O_3$  (Moulin et al., 2006).

O *PACVD* (*Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition*) corresponde a um processo misto onde os processos *PVD* e *CVD* são combinados de forma sequencial na mesma câmara. Aqui o processo *CVD* é modificado para ocorrer a temperaturas entre 180 a 350 °C. Para que isto seja possível, a decomposição dos gases que geram a camada a ser depositada é ativada por plasma. Esta técnica permite formar camadas de *DLC* (*Diamond Like Carbon*) que confere ao revestimento elevada dureza e baixo coeficiente de atrito (Vandenbulcke & Herbin, 1984).

O *FCVA* (*Filtered Cathodic Vacuum Arc*) consiste em utilizar uma filtragem eletromagnética dos compostos que serão aplicados na película de revestimento. A remoção de impurezas destes compostos permite a obtenção de revestimentos mais densos e duros. Este processo pode produzir revestimentos de *TaC* (Kang et al., 2010).

## **2.7 Qualidade superficial**

As superfícies apresentam irregularidades, sendo estas classificadas em: desvios macro geométricos e desvios micro geométricos. A incapacidade de obter perfeição na qualidade da superfície maquinada corresponde ao acumular de defeitos que resultam das características do material a maquinar, estado da ferramenta, parâmetros de corte ou estado da máquina. Assim, o objetivo final é a otimização de todos os fatores causadores de

defeitos, de modo que a sua influência seja diminuída e assim alcançar valores de rugosidade dentro das especificações técnicas pretendidas pelo cliente. Uma diminuição dos valores da rugosidade implica o aumento dos custos de fabrico, devido à necessidade de operações complementares ou substituição de ferramentas de corte (Davim, 2008; João Manuel R. S. Tavares, 2012):

A rugosidade requer especial atenção uma vez que tem influência em funcionalidades como a qualidade do deslizamento, na materialização dos ajustamentos apertados, na qualidade da aderência de revestimentos, na vedação estática e dinâmica.

Existem diversos critérios para quantificar as amplitudes das rugosidades, entre os quais se destacam (João Manuel R. S. Tavares, 2012; Pritchard & Mitchell, 2020).

$R_a$  - Este parâmetro corresponde ao desvio médio aritmético do perfil avaliado. Também conhecido como *CLA – Center Line Average* ou *AA – Arithmetic Average* - na Inglaterra e nos Estados Unidos da América, respetivamente. É o parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo, aplicável à maioria dos processos de fabricação.

Por definição não permite diferenciar os perfis inversos, relativamente à linha média e, portanto, não fornece nenhuma informação sobre a robustez ou fragilidade de um perfil, nem sobre a aptidão das peças para exercerem convenientemente a função para que foram projetadas. Este critério é relativamente pouco sensível aos valores acidentais de amplitude máxima, que não têm nenhuma ação funcional, e também a uma crista ou cava atípica, ocultando o defeito, mas permite diferenciar diversos perfis de rugosidade caraterísticos.

Na Figura 23, apresenta-se valores de  $R_a$  usualmente observados nos diferentes processos de maquinagem.

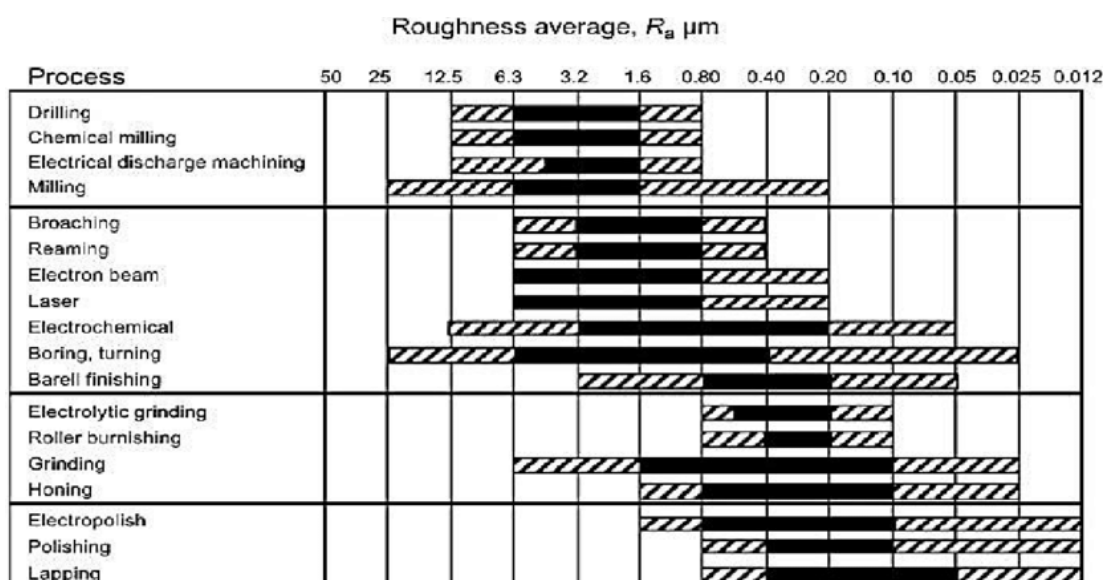


Figura 23 - Rugosidade média aritmética associada aos processos de maquinagem (Muhamad et al., 2019).

$R_z$  - No sistema *DIN* ( $R_zD$ ): Corresponde à média aritmética das alturas máximas do perfil medidas em cinco comprimentos de base consecutivos. Pode ser utilizado nos seguintes casos: superfícies onde defeitos isolados não têm influência na função da peça a ser controlada; superfícies onde o perfil é periódico e conhecido. Este parâmetro fornece indicação sobre a deterioração vertical média das superfícies e define muito bem as superfícies, em perfis periódicos, mas não dá informações suficientes sobre as formas dos perfis e dos seus comprimentos de onda (M. M. Amaral et al., 2009).

[ 11 ]

$$R_zD = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 z_i$$

É determinado tendo em conta [ 11 ], onde  $z_i$  corresponde à altura pico-vale em cada um dos filtros de corte e de acordo com a Figura 24. É geralmente mais sensível às mudanças no acabamento superficial do que o parâmetro  $R_a$ , sendo um critério útil no controlo de um processo produtivo.

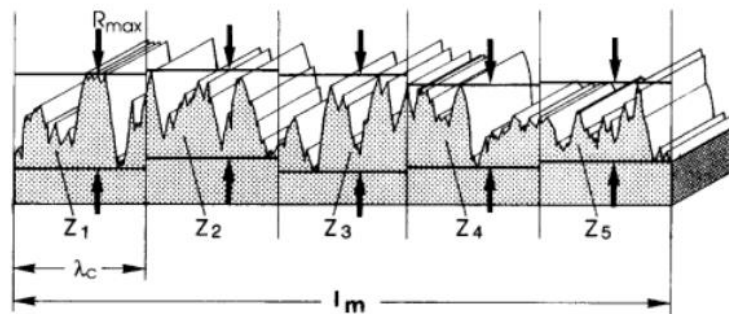


Figura 24 - Representação determinação parâmetro rugosidade  $R_zD$  (Dinis Correia, 2009).

No sistema *ISO* ( $R_zI$ ): corresponde à distância média entre as cinco maiores cristas e as cinco cavas mais profundas em todo o comprimento analisado (International Standard, 1997). Sendo determinado por [ 12 ] e Figura 25. Neste parâmetro a localização dos picos e vales não é determinada em cada comprimento de corte, mas em todo o comprimento analisado.

[ 12 ]

$$R_zI = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 p_i + \sum_{i=1}^5 v_i \right)$$

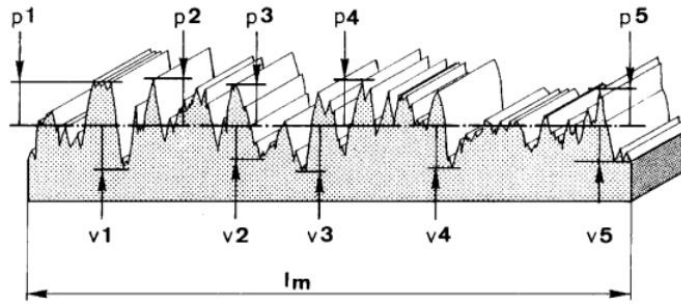


Figura 25 - Representação determinação parâmetro rugosidade  $RzI$  (Dinis Correia, 2009)

A desvantagem deste parâmetro prende-se na possível distorção do perfil caracterizado caso existam cristas elevadas e cavas profundas muito próximas. Se tal acontecer, o parâmetro é influenciado e não indicará a condição média do perfil da rugosidade. No sistema *JIS*: É obtido através da distância média entre as cinco maiores cristas e as cinco cavas mais profundas.

$R_{3z}$  - Este parâmetro é uma variação de  $R_z$ . Corresponde à média aritmética das alturas máximos do perfil em cinco comprimentos de base consecutivos do terceiro pico mais alto ao terceiro vale mais profundo, dentro do comprimento de base.

$R_t$  - define-se como a altura total do perfil da rugosidade. Neste parâmetro a localização dos picos e vales não é definida em cada comprimento de corte, mas em todo o comprimento analisado. Tem a desvantagem de em superfícies com picos localizados o parâmetro ser afetado sem que isso seja representativo da superfície em análise.

$R_q$  - Corresponde à raiz quadrada da média aritmética dos valores quadráticos das coordenadas do perfil. Determinado por fórmula descrita em [ 13 ].

[ 13 ]

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} y^2(x) dx}$$

$R_p$  - Definido com a altura máxima do perfil acima da linha média ao longo do comprimento base.

$R_{pm}$  - Definido como a média aritmética das alturas máximas do perfil ( $R_p$ ) obtido em cada comprimento de base. O parâmetro  $R_{pm}$  pode ser útil na previsão das características superficiais. A relação  $R_{pm}/R_{zD}$  quantifica a assimetria do perfil (Dinis Correia, 2009).

## 2.8 Lubrificação e refrigeração

O emprego da lubrificação e refrigeração no corte por arranque de apara detém dois objetivos distintos: a redução do coeficiente de atrito e a diminuição da temperatura. A aplicação de lubrificante/refrigerante na zona de formação da apara melhora o corte e possibilita a obtenção de um melhor acabamento superficial. A sua dupla função permite evitar a formação de aresta postiça de corte, aumentar a vida da ferramenta, evitar acentuadas deformações na superfície devido aos gradientes térmicos de corte e impedir a modificação da microestrutura do material maquinado (Davim, 2008). O efeito lubrificante diminui o coeficiente de atrito na interface apara/face de ataque da ferramenta, atenua a formação da aresta postiça. O efeito refrigerante diminui a temperatura de corte, podendo empregar-se velocidades de corte mais elevadas sem uma deterioração tão acentuada da ferramenta de corte. As deformações e modificações microestruturais da superfície também diminuem. No entanto, na prática verifica-se uma ineficácia na utilização de lubrificante/refrigerante na gama alta das velocidades de corte como consequência da incapacidade de penetrar na zona de formação de apara.

No que respeita ao efeito lubrificante é necessário que entre a apara e a ferramenta se forme uma película lubrificante constante durante o corte. É, então, importante o modo de aplicação dos lubrificantes e a maneira como estes penetram nos locais onde existe movimento relativo.

Os lubrificantes utilizados no corte por arranque de apara podem classificar-se em: agentes de melhoria de corte sólidos e fluidos de corte (líquidos e gasosos). Os fluidos de corte líquidos são, de longe, os mais utilizados no meio industrial (Davim, 2008).

Os agentes de melhoria de corte, sólidos, aplicam-se de dois modos diferenciados:

Lubrificante sólido, pó misturado com massa ou óleo viscoso aplicado diretamente na face de ataque da ferramenta, antes da maquinagem;

Aditivo metalúrgico, elementos adicionados durante o fabrico do metal que vai ser maquinado. De exemplo encontra-se o caso do enxofre, selénio e chumbo que são adicionados aos aços de corte fácil ou de maquinabilidade melhorada.

No que diz respeito aos fluidos de corte líquidos, é importante ter em mente a dificuldade de fazer o fluido alcançar as interfaces apara/face de ataque da ferramenta e peça/face de saída.

Quanto à ação dos fluidos de corte, líquidos, pode considerar-se a ação física como a redução do coeficiente de atrito e a refrigeração. No que diz respeito à ação química, esta ocorre

quando os fluidos de corte contêm elementos suscetíveis de reagir com os constituintes do metal a ser maquinado. Os fluidos de corte podem ser catalogados em três grupos:

Óleos puros – estes óleos apresentam grande interesse pela variedade e o baixo custo. Estes podem ser ativos ou inativos. Os óleos ativos são indicados para elevadas pressões e utilizados na maquinagem de aços em condições de corte severas, contêm propriedades anti adesivas e lubrificantes sendo apto para trabalhos com pressões elevadas. Usualmente designado de óleo de corte *EP* – “*Extreme Pressure*”. Os óleos inativos são empregues com um duplo objetivo, como fluido de corte e como lubrificante dos suportes e mecanismos da máquina-ferramenta. Utilizados na maquinagem de ligas de cobre e outras ligas não ferrosas, onde carece de uma ação refrigerante sem a possibilidade de empregar uma emulsão de óleo solúvel.

Óleos emulsionáveis – designam-se por óleos emulsionáveis aqueles que se misturam com água e originam uma emulsão. A água apresenta excelentes resultados a nível de refrigeração, no entanto apresenta algumas desvantagens como oxidação e baixo valor lubrificante. A adição de agentes antioxidantes e lubrificantes podem melhorar estas características da água. Estes óleos podem ser classificados em transparentes, pesados e opacos. Os óleos transparentes contêm uma elevada percentagem de sabão, de forma a tornar os mesmos quase transparentes de forma a facilitar a visualização e controlo da maquinagem a realizar. Os óleos pesados apresentam uma grande viscosidade e, misturados com água, formam uma emulsão estável com características de elevada pressão suficientes para operações de corte pesadas (Davim, 2008). Os óleos opacos apresentam uma emulsão de cor branca láctea quando misturados com água, sendo estes de baixo custo com boas características de refrigeração e anti oxidação.

Óleos sintéticos – correspondem a agentes químicos envolvidos com água. As vantagens prendem-se na elevada capacidade de refrigeração e a vida útil prolongada. Como agentes químicos usados têm-se (Davim, 2008);

- Aminas e nitritos, para impedir corrosão;
- Fosfatos e boratos, para diminuir a dureza da água;
- Sabões e agentes de molhabilidade, para lubrificação e diminuição da tensão superficial;
- Glicóis, para agentes aglomerantes;
- Germicidas, para controlo da proliferação de bactérias.

Por fim, no que respeita aos lubrificantes gasosos, a penetração dos gases efetua-se do mesmo modo, no entanto, mais facilmente que a dos líquidos. A sua ação é, principalmente, refrigerante. A remoção de calor não é tão eficiente como com os líquidos, devido à baixa

capacidade calorífica dos gases. Por forma a compensar esta desvantagem utiliza-se elevadas velocidades e pressões bem como baixas temperaturas dos gases aplicados (Davim, 2008; Pinho de Jesus, 2015).

A utilização de fluidos de corte com efeito de refrigeração permite a redução da temperatura, facilita o manuseamento da peça acabada e garante uma redução das distorções na peça, devido a gradientes de temperatura gerados pelo processo. Quando utilizado como lubrificante, permite uma redução da fricção nas faces de ataque e saída da ferramenta, prevenção da corrosão, redução das forças e consumo de energia e a melhoria do acabamento superficial do componente maquiando devido a uma apara regular e a uma redução da formação da apara aderente (Pinho de Jesus, 2015).



Figura 26 - Refrigeração externa (Ridgeback Engineering Supplies, 2021).

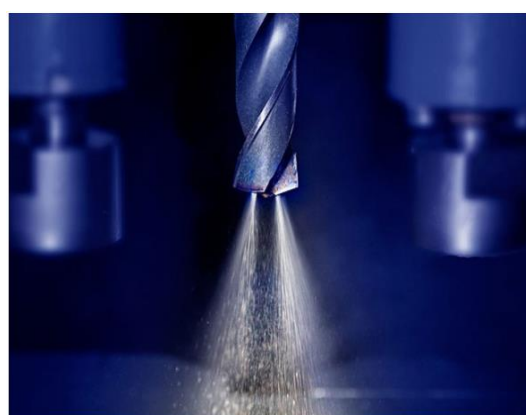


Figura 27 - Refrigeração interna (Beku Oil GmbH, 2021).

Consoante a aplicação, pode ser exigido ao lubrificante ter algum grau de transparência e/ou ser compatível com os óleos lubrificantes da máquina a utilizar (Association, 1992). Os fluidos de corte podem ser projetados para a superfície maquinada de uma de ou de duas formas distintas: projeção externa ou projeção interna, conforme apresentado na Figura 26 e Figura 27. A projeção externa é feita através de canais ajustáveis que permitem a orientação de projeção de fluido, no caso da projeção interna esta utilizada canais de refrigeração existentes no interior da ferramenta (Pinho de Jesus, 2015).

Para além da zona por onde é projetado o lubrificante, existem também soluções tecnológicas diferenciadas para a sua projeção. A utilização de corte pressurizado, superior a 10 bar, pode ser uma alternativa aos métodos convencionais, permitindo uma lubrificação mais eficiente. A lubrificação deve ser ainda capaz de vencer o efeito da contra corrente gerada pelo arranque da apara (Esteves Correia, 2005).

A utilização de fluidos de corte constitui um dos principais fatores de poluição industrial. Na ótica ambiental e dos custos de produção, a maquinaria sem fluidos de corte constitui a melhor opção. No entanto, é essencial a consideração do desgaste da ferramenta e o

declínio da qualidade superficial da peça maquinada. Desta forma, torna-se importante a tentativa de otimizar e maximizar o potencial da refrigeração/lubrificação, se assim for necessário. Como tal, observa-se a uma expansão de soluções como a empregabilidade de fluidos de corte biodegradáveis, a utilização de quantidades mínimas de fluido de corte ou a utilização de fluidos de corte gasosos.

Destas soluções surge, então, o princípio de quantidade mínima de lubrificação *MQL* – *Minimal Quantity Lubrication*. Este fundamento consiste na aplicação de um filme pressurizado na zona de corte, conforme ilustrado na Figura 28, constituído por gotículas de óleo dispersas num fluxo de ar. Esta técnica proporciona a projeção de aparas na zona de trabalho, ao invés das mesmas serem controladas e arrastadas para fora desta mesma zona. Esta projeção constitui um inconveniente a esta técnica (Boubekri & Shaikh, 2012; Davim, 2008; Gaitonde et al., 2008; Gaurav et al., 2020; Pinho de Jesus, 2015). Na Figura 28 e Figura 29 apresentam-se as duas soluções anteriormente expostas.

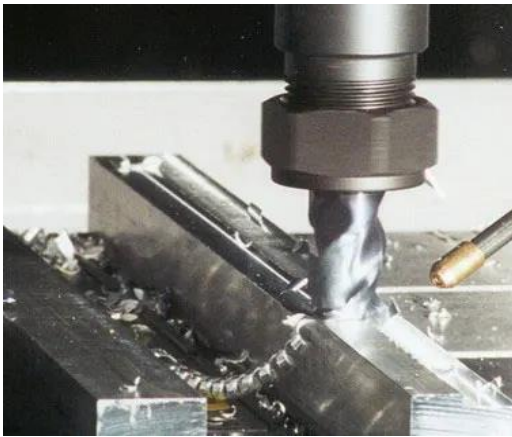


Figura 28 - Maquinagem com sistema de refrigeração *MQL* (Unist, n.d.)



Figura 29 - Maquinagem com sistema de refrigeração abundante convencional. (Unist, n.d.)

### **3. Ligas Cu – Zn**

A maquinabilidade depende fortemente do material a maquinar. Por este motivo, é imprescindível uma revisão geral sobre as ligas que compõem os componentes que serão alvo de estudo nesta dissertação, sendo também apresentado posteriormente uma revisão sobre a sua maquinabilidade.

Dentro da diversa gama de ligas de cobre, as ligas de cobre e zinco (*Cu – Zn*) têm especial notoriedade devido às suas características, estas conferem-lhe uma vasta gama de aplicações. A adição de zinco ao cobre, tende a aumentar a resistência mecânica, dureza e ductilidade da liga, além de diminuir o seu ponto de fusão, a densidade, resistência à corrosão e o preço. São assim alcançadas propriedades como a boa resistência à corrosão e ao desgaste, boa condutividade elétrica e térmica e excelentes propriedades antibacterianas (Nobel et al., 2014, 2015; Podany & Slama, 2014).

#### **3.1. Caracterização das ligas de Cu – Zn**

Relativamente à composição química, a liga *Cu – Zn* é considerada bifásica, apresentando uma microestrutura composta por duas fases: fase  $\alpha$  e fase  $\beta$ . De acordo com o diagrama de equilíbrio do sistema binário *Cu – Zn*, Figura 30, as ligas com percentagens de zinco até aproximadamente 30% solidificam numa só fase, formando uma solução sólida, fase  $\alpha$ . Esta é muito rica em cobre, e como tal, apresenta a mesma estrutura cristalográfica que o cobre puro, sendo uma estrutura cúbica de faces centradas. A fase  $\alpha$  é caracterizada pela elevada ductilidade e resistência. Contribuindo de forma negativa no processo de maquinação deste tipo de ligas, uma vez que promove a formação de aparas longas e helicoidais (Brito & Gordo, 2006; Laakso et al., 2019).

Em percentagens de teor de zinco compreendidas entre os 38 e 50%, a microestrutura do latão exhibe a presença de um segundo microconstituente, denominado de fase  $\beta$ . Esta nova fase apresenta uma estrutura cristalina CCC, mais dura e resistente que a fase  $\alpha$ . Esta fase influencia positivamente a maquinabilidade, promovendo a fragmentação da apara (Laakso et al., 2019; Peng, 2017).

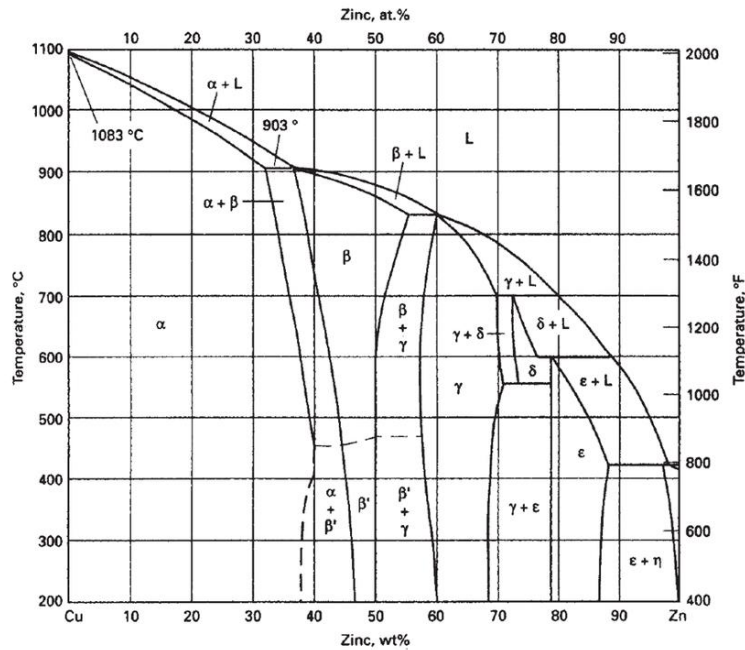


Figura 30 - Diagrama de fases **Cu – Zn** (Peng, 2017).

A partir de 50% de zinco, existe formação de um constituinte não metálico, denominada fase  $\gamma$ , duro e frágil, o qual impede a aplicação industrial destas ligas, não tendo uso prático.

O latão é uma variante desta liga binária de cobre e zinco, sendo que em termos de composição apresenta o cobre, elemento principal, usualmente numa percentagem não inferior a 55% da composição química da liga, enquanto o zinco apresenta uma percentagem entre 5 e 45%. Uma vez que estes elementos aparecem em maior quantidade, são responsáveis pela definição da estrutura do latão: monofásica ou bifásica. Além destes dois elementos, podem ainda ser adicionados elementos de ligas minoritários tais como: chumbo; silício; alumínio; ferro; manganês; estanho; níquel ou arsénio, melhorando determinadas propriedades ou características. De seguida são apresentadas as principais características dos elementos de liga referidos anteriormente:

Alumínio – em adição ao latão melhora a fluidez e reduz as perdas de zinco por volatilização. Além disto, garante maior resistência à corrosão do latão. O alumínio é ainda um elemento bastante betagêneo, sendo um elemento estabilizador da fase  $\beta$ . Como tal, aumenta fortemente a resistência mecânica do latão, tornando-o mais frágil.

Chumbo – constitui um elemento bastante útil e benéfico nos processos de fundição e de maquinagem. Na fundição evita o aparecimento de micro repuxos, enquanto na maquinagem atua como lubrificante, reduzindo esforços de corte. Funciona como um elemento betagêneo. No entanto, elevadores teores reduzem a resistência à tração do latão, provocando o aparecimento de fissuras a quente durante a solidificação das peças fundidas.

Estanho – este elemento melhora a resistência à corrosão do latão, em particular a resistência à dezincificação. As propriedades mecânicas do latão são também melhoradas com a presença de estanho. Contudo, a adição deste elemento de liga deverá corresponder a um teor inferior a 0.3%, por forma a evitar fissuração a quente durante o arrefecimento.

Ferro – atua como refinador de grão, traduzindo-se numa melhora na resistência mecânica a quente e conseqüente redução do aparecimento de fissuras, no arrefecimento de peças de geometria complexa. O ferro melhora ligeiramente a vazabilidade do latão. Contudo, sendo este um elemento reativo, quando presente em grandes quantidades e na presença de outros elementos, ocorre a possibilidade de formação de “pontos duros”.

Níquel – acarreta melhorias à liga a nível de resistência à corrosão da mesma. Dado o seu elevado custo, não é utilizado em maiores percentagens. Um outro aspeto negativo deste elemento é o facto de reduzir a maquinabilidade da liga.

Silício – elemento bastante betagéneo, tornando o latão mais duro e resistente. Apesar de ser um promotor de boa vazabilidade, o silício tem uma elevada tendência para, juntamente com o ferro e o manganês, formar pontos duros, sendo que o seu teor não deverá exceder os 0.05%.

Fósforo e Arsénio – Quer o fósforo quer o arsénio melhoram a resistência à dezincificação do latão.

Antimónio e Bismuto – Estes dois elementos em conjunto não devem exceder 0.01% sob pena de deteriorarem as propriedades mecânicas do latão.

Magnésio – corresponde a um potente desoxidante do latão e torna a sua coloração mais clara.

### **3.2. Maquinabilidade do latão**

A maquinabilidade do cobre e das ligas de cobre pode ser dividida em três categorias: altamente maquináveis; moderadamente maquináveis e ligas difíceis de maquinar. A maquinabilidade de cada grupo foi definida tendo em conta as forças de corte envolvidas no processo, o tipo de apara formada, o desgaste verificado na ferramenta e a qualidade superficial, geralmente avaliada pela rugosidade. Uma análise a estes parâmetros permite estabelecer um índice de maquinabilidade, que corresponde a uma escala de comparação entre a maquinabilidade dos materiais (Klocke et al., 2010). Este índice, como referido anteriormente, é usualmente utilizado em termos comparativos, e não numa escala absoluta. A comparação é utilizada aquando da realização de testes a novos materiais, procurando utilizar-se materiais previamente conhecidos como base de referência. Tendo por base materiais já conhecidos, é possível realizar uma análise comparativa entre os

vários. Definem-se, de acordo com quatro critérios, quatro índices que constituem o índice de maquinabilidade, sendo eles:

- Índice de força relativa (*RFRI – relative force rating index*) – baseado nas forças de corte, é obtido pela divisão entre as forças de corte do material a analisar e o material de referência;
- Índice de desgaste da ferramenta (*RTRI – relative tool wear rating index*) – o desgaste da ferramenta é avaliado no novo material, comparativamente ao de referência, e é calculado analogamente ao anterior;
- Índice de rugosidade superficial (*RRRI – relative roughness rating index*) – este índice reflete a rugosidade obtida na maquinação do novo material, quando comparada com a rugosidade do material de referência. O processo de cálculo é semelhante aos dois índices anteriores;
- Índice de classificação do tipo de apra (*RCRI – relative chip type rating index*) – é baseado no tipo de apra, e é calculado pela divisão entre as classificações da apra do material a analisar e do material de referência.

A análise destes índices é subjetiva, obtendo-se apenas análises comparativas. Estes parâmetros são avaliados sempre em função de um dos ensaios, sendo este considerado como o valor de referência (Taha et al., 2012).

A maioria das ligas de latão tem adição de uma pequena quantidade percentual de *Pb*, entre 1 e 3%, com a pretensão de aumentar a maquinabilidade da liga. O chumbo diminui o tamanho do grão e, como é pouco ou nada solúvel no cobre, dispõem-se sobre a forma de glóbulos na microestrutura, particularmente nas fronteiras entre as fases  $\alpha$  e  $\beta$ . A diminuição de diâmetro dos glóbulos de chumbo e o aumento da sua densidade faz com que, durante as diversas operações de maquinagem, o chumbo funda, dando origem a uma fina película semilíquida que atua como lubrificante, baixando o coeficiente de atrito entre a ferramenta e o material, criando descontinuidades que promovem a fragmentação da apra, reduzindo os esforços de corte e o desgaste da ferramenta.

Apesar do conhecimento das características que o chumbo garante ao material a maquinar, o uso deste elemento tem sido restringido devido ao efeito deste elemento para a saúde e ambiente.

De acordo com (Schultheiss et al., 2016), para as condições de ensaio em torneamento cilíndrico de  $V_c = 400 \text{ m min}^{-1}$ ,  $a_p = 0.5 \text{ mm}$  e  $f_n = 0.3 \text{ mm rot}^{-1}$ , para duas ligas de latão com diferentes composições de *Pb*, de 0.09% e 3%, as forças de corte foram de 800 e 580 *N*, respetivamente. Através desta comparação, é possível ter uma ordem de grandeza para comparação e verificar a influência do elemento *Pb* na maquinabilidade das ligas de latão.

As potências de corte são também relevantes num processo industrial, onde pequenos ganhos se traduzem em grandes melhorias. Neste contexto, (Toufatzis et al., 2016) concluiu que a potência de corte depende essencialmente de  $a_p$  e de  $f_n$ , fatores esses que, quando otimizados se podem traduzir numa poupança de energia no processo. A quebra da apara não é uma questão tão importante em ligas de latão com maior quantidade de  $Pb$ , pois a apara é descontínua e quebra com relativa facilidade. Ao invés, com a diminuição da contribuição de  $Pb$ , a questão da apara surge com o aparecimento de dificuldades na quebra da mesma. A dificuldade na quebra da apara pode dificultar bastante o processo produtivo, sendo que poderá ser aconselhada a utilização de uma geometria na ferramenta com quebra-apara, ainda que tal resulta num incremento de custos da ferramenta (Schultheiss et al., 2016).

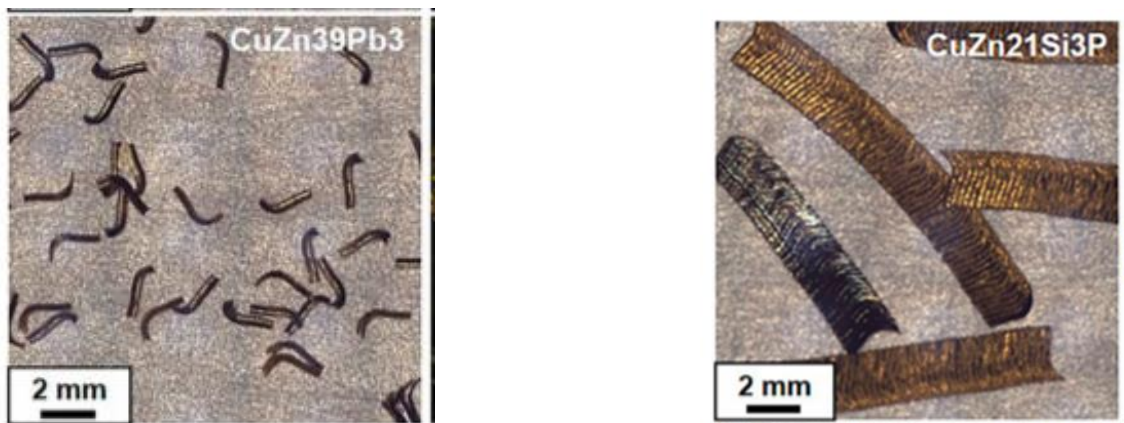


Figura 31 - Apara de maquinagem das ligas  $CuZn21Si3P$  e  $CuZn39Pb3$ , respetivamente  $V_c = 400\text{ m/min}$ ;  $f_n = 0.2\text{ mm/rot}$ ;  $a_p = 2\text{ mm}$  (Schultheiss et al., 2016).

Segundo (Wilborna et al., 2013), o tamanho do grão é cerca de dez vezes menor quando existe adição de chumbo, comparativamente entre ligas com cerca de 0.05% e 3% deste mesmo elemento. Ao atuar como lubrificante da ferramenta, o  $Pb$  possibilita um menor desgaste da ferramenta e maiores taxas de produção. (Schultheiss et al., 2016) estudou o efeito do  $Pb$  no desgaste das ferramentas e conclui que a contribuição deste elemento é muito significativa. Após 142 minutos de maquinagem de latão com um reduzido teor de  $Pb$  (0.09%), verifica-se que a ferramenta (sem quebra- aparas) apresenta um desgaste considerável (craterização) e que fraturou, não podendo ser mais utilizada. Segundo técnicas de microscopia eletrónica, verifica-se que a craterização ocorre pela difusão de elementos de cobalto na apara resultante. A desagregação deste elemento na matriz da ferramenta faz com que a ligação da sua estrutura enfraqueça e daí resulte o desgaste, craterização. Por outro lado, quando maquinada uma liga de latão com alto teor de  $Pb$  (3%), o desgaste ao fim dos mesmos 142 minutos que a liga anterior não apresentava um desgaste reduzido, terminando o ensaio ao fim de 160 minutos de trabalho, evidenciando-se apenas pequenos sinais de craterização.

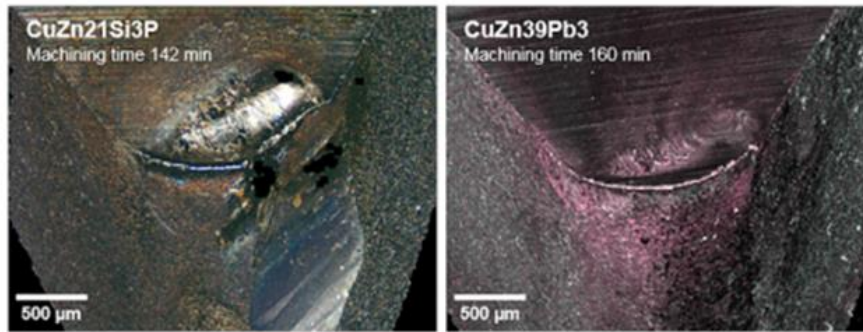


Figura 32 - Desgaste comparativo em WC na maquinagem de ligas de latão com diferentes composições de *Pb*, **CuZn21Si3P** com 0,09% e **CuZn39Pb3** com 3% (Schultheiss et al., 2016).

O efeito do *Pb* na maquinagem é variável consoante a sua composição química na liga, determinando esta o tamanho dos grãos, a sua dispersão na matriz e as propriedades do material devidas à sua microestrutura. As partículas de *Pb* e a fase  $\beta$  são os constituintes estruturais com maior influência na morfologia e tamanho da aparta. Enquanto as partículas de *Pb* controlam a quebra da aparta, a fase  $\beta$  influencia a formação de microfissuras e de zonas de concentração de tensões de corte (Toufatzis et al., 2016). A sua contribuição para a composição química da liga geralmente não ultrapassa os 3%.

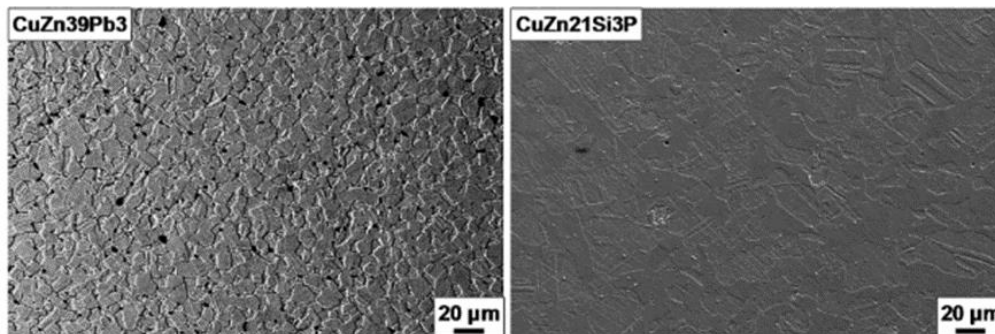


Figura 33 - Exemplos de microestruturas de ligas de latão com chumbo: 3,3% e 0,9%, respetivamente (Schultheiss et al., 2016).

O chumbo tem vindo a ser restringido na produção de diversos componentes, como visto anteriormente. Em contrapartida, têm sido experimentados diversos elementos para a substituição do mesmo. Para além do fósforo, selénio, silício e o índio, o bismuto tem sido o mais desenvolvido. Embora os resultados não tenham sido ainda bastante satisfatórios, o bismuto tem sido o mais aplicado pois melhora a maquinabilidade do material. Apesar dessa vantagem, sacrifica algumas propriedades mecânicas das ligas de latão, fragilização do cobre, e é mais caro em cerca de dez vezes comparativamente ao chumbo.

### **3.3. Maquinagem na Mepisurfaces**

O departamento de Maquinação é um departamento com grande relevo no processo produtivo, onde existem 16 centros de maquinagem com Comando Numérico Computorizado, hábeis de produzir elevadas taxas de produção, na ordem das milhares peças produzidas. Nestes equipamentos, as operações de maquinagem realizadas são a furação e a fresagem, sendo o abastecimento de peças manual ou por paletes, no caso dos centros mais avançados.

#### **3.3.1. Ferramentas de corte**

Cada componente produzido e maquinado na Mepisurfaces é único, sendo desta forma o seu perfil geométrico a maquinar igualmente único. A existência de perfis singulares dificulta a utilização de ferramentas ditas standard e obriga a utilização de ferramentas especiais e customizadas. As principais operações de maquinagem são a furação, fresagem e roscagem, havendo, contudo, operações de torneamento em componentes que necessitam de “diamantagem”.

#### **3.3.2. Operações e parâmetros**

Para o fabrico de todos os componentes na Mepisurfaces, as operações de maquinagem utilizadas são, por ordem de utilização, a fresagem, a furação e a roscagem.

A parametrização de todas as variáveis de corte é efetuada em consideração do perfil geométrico, o material da ferramenta, a liga utilizada e a própria experiência adquirida na área. Os parâmetros de corte introduzidos na programação dos centros *CNC* são a velocidade de corte, estabelecida através da frequência de rotação, e a velocidade de avanço da mesa/ferramenta.

No que diz respeito ao perfil geométrico, este é contabilizado para o cálculo da velocidade, onde é também considerado o material utilizado. A velocidade de corte, depende da operação, variando entre 90 e 500 *m/min*. O avanço da ferramenta é de 1000 a 1500 *mm/min* em operações de desbaste e 300 a 500 *mm/min* para operações de acabamento. Com a total definição destes parâmetros, podem ainda ser feitos alguns ajustes, mediante o interesse produtivo de um maior número de peças maquinadas (parâmetros mais agressivos), ou então no sentido de poupança económica das ferramentas (parâmetros suavizados). Dado a elevada cadência produtiva, a utilização de fluidos de corte é indispensável por todos os motivos anteriormente referidos. Os fluidos de corte utilizados são líquidos, mais especificamente óleos emulsionáveis (emulsões). A emulsão é distribuída entre 7 e 8 *bar* aproximadamente, e é constituída por cerca de 5 % de óleo de corte e 95% de água.



## 4. Estudo da maquinabilidade de Ligas Cu-Zn

A grande maioria dos componentes maquinados na Mepisurfaces têm por base as ligas Cu – Zn e, para uma melhor compreensão do processo de maquinagem, é necessário conhecer os materiais utilizados. Neste capítulo pretende-se compreender algumas interações ferramenta-peça. Pretende-se, após a caracterização da composição da liga do latão, expor a influência do número de insertos intercambiáveis de uma fresa na dureza e no acabamento superficial dos componentes maquinados.

### 4.1. Procedimento experimental

A estrutura dos ensaios de caracterização dos materiais é definida da seguinte forma:

- **Análise de dureza:** A dureza equivale a uma das propriedades essenciais para a caracterização do material. Para tal, foram realizadas medições de dureza no laboratório de Materiais da Universidade da Beira Interior, com recurso a um Micrómetro *Vickers e Knoop Mitutoyo AVK-C2*. Os ensaios de dureza *Vickers (HV, 20 N)* foram realizados com um indentador piramidal com ponta de diamante. É necessário reconhecer também um intervalo de tempo de espera entre a penetração da pirâmide e a remoção da mesma. Isto deve-se à necessidade de o material estabilizar a sua deformação e salvaguardar que não ocorra retrocesso elástico após a remoção do indentador. Nos ensaios realizados foi utilizado um intervalo de tempo de quinze segundos.
- **Análise química:** A análise foi realizada no Departamento de Galvanoplastia da Mepisurfaces, com recurso a um espectrómetro *XRF Fischerscope XDV-SDD*, sendo possível analisar a percentagem de *Cu, Zn e Pb*. Foram realizados seis ensaios com um tempo de medição equivalente a vinte segundos.
- **Ensaio de maquinagem:** Foram realizados ensaios de maquinagem com recurso a um centro de maquinagem vertical de três eixos *Chiron FZ 08S Magnum*. Os ensaios basearam-se no desbaste de  $0,03\text{ mm}$  do componente bruto para obter o resultado final pretendido pelo cliente de superacabamento, a ferramenta utilizada corresponde a uma fresa com diâmetro de  $32\text{ mm}$  e 4 insertos intercambiáveis. A rotação e o avanço foram iguais para todos os ensaios realizados, correspondendo a  $10200\text{ rpm}$  e  $500\text{ mm/min}$ , respetivamente. A rotação é positiva e o desbaste é realizado em duas passagens. A diferença dos ensaios subsiste no número de insertos utilizados no processo de desbaste, utilizando 4, 3, 2 e 1 insertos, e também 2 insertos com desgaste, sendo daqui em diante estas amostras apelidadas de amostra A, B, C, D, E, respetivamente. Os insertos utilizados não possuíam qualquer

tipo de uso anterior a estes ensaios de maquinação à exceção dos utilizados na última amostra.

- Medição de rugosidades: Estas medições foram realizadas no *fluidslab* da Universidade da Beira Interior, por meio da utilização de um rugosímetro *HommelTester T1000*. Foram realizadas medições em cada uma das amostras em duas direções perpendiculares, com três medições em cada direção.

Relativamente às amostras utilizadas nos diversos ensaios, é feita a sua caracterização geométrica na Figura 34.

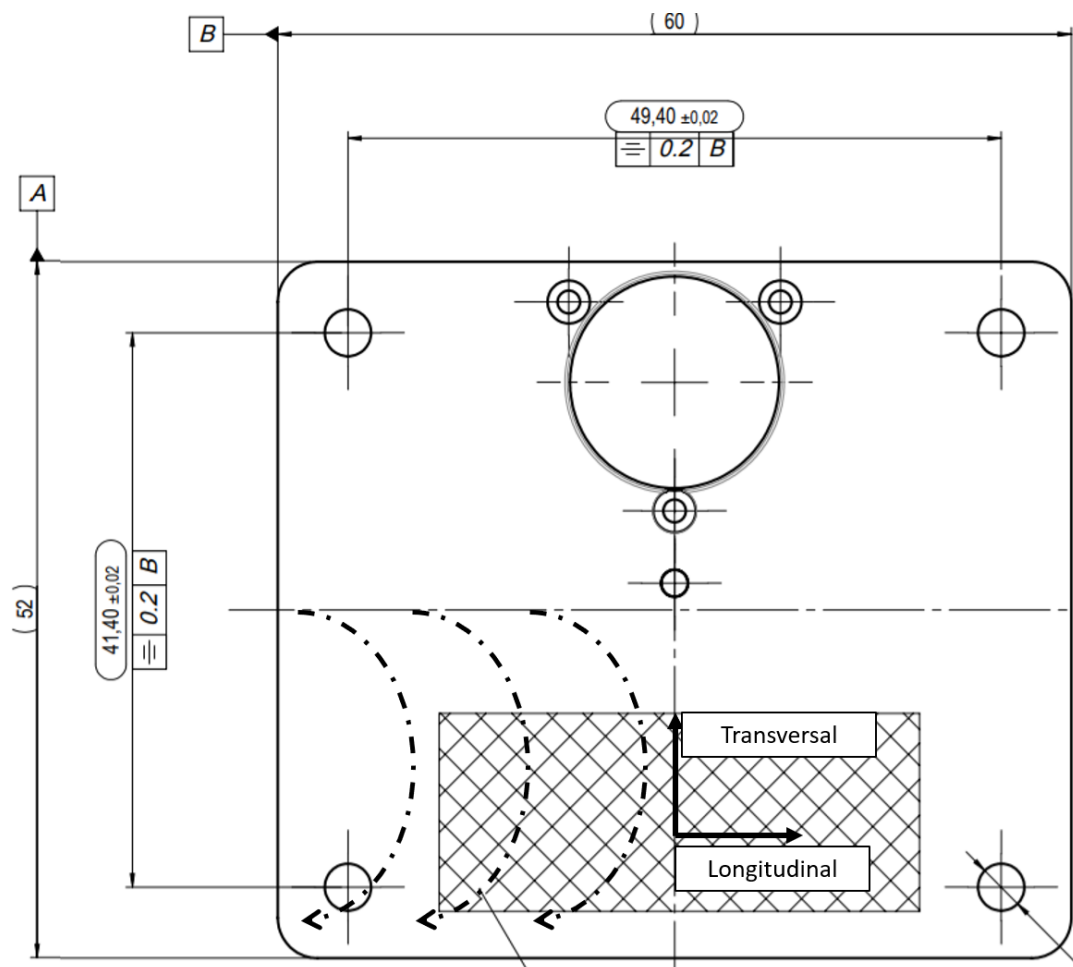


Figura 34 - Caracterização amostra em estudo, direções longitudinal e transversal e sentido de maquinação.

## 4.2. Análise e discussão de resultados

Com base no procedimento experimental anteriormente exposto, foram realizados os ensaios e obtidos os valores de composição de liga, dureza e rugosidade.

### 4.2.1. Análise de dureza Vickers

Na Tabela 10 são apresentados os resultados.

Tabela 10 - Resultados ensaios dureza Vickers.

Amostra	Dureza [HV]	Desvio padrão
A	139,2	3,187
B	146,2	4,707
C	150,2	6,794
D	163,6	5,953
E	180,7	10,71

Por observação da Tabela 10, é possível notar um padrão. Sendo possível verificar que o número de insertos influencia a dureza de forma inversa, sendo a dureza menor com o aumento do número de insertos. No entanto, também é possível concluir que o desgaste dos insertos tem influência na dureza final da peça, sendo esta maior com o aumento do desgaste. De seguida, é apresentado a relação entre a dureza e o número de insertos, sendo possível observar a influência dos insertos.

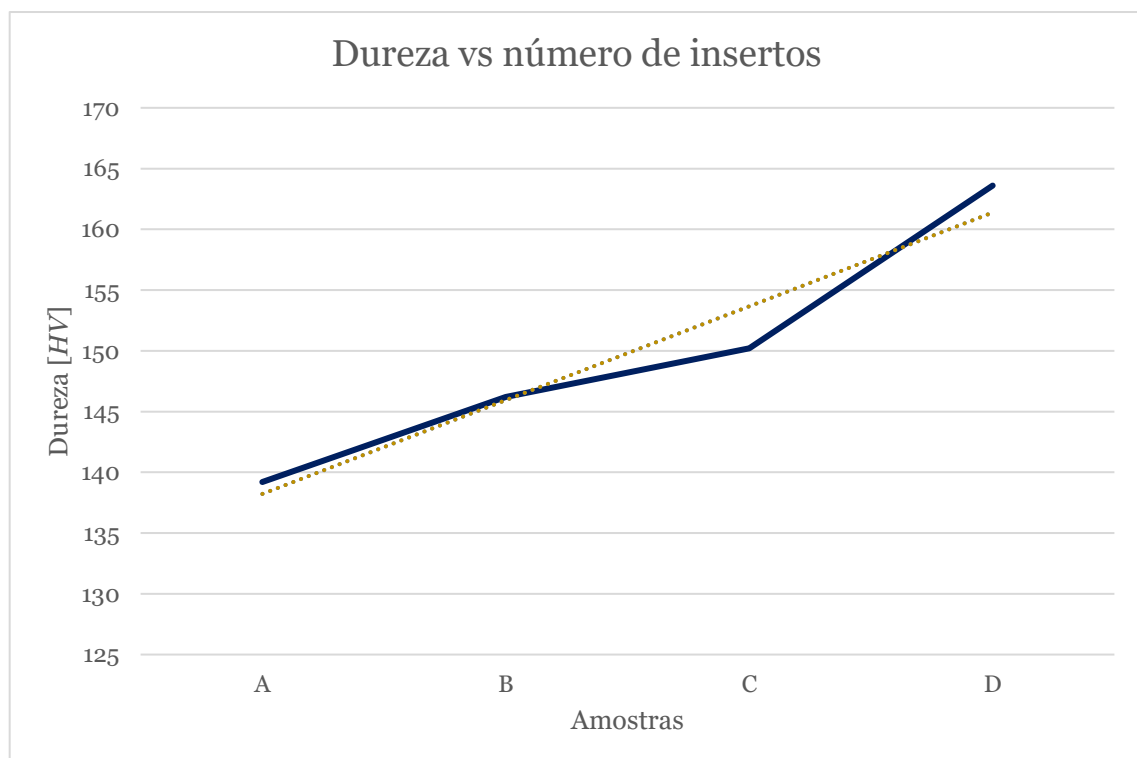


Figura 35 - Relação dureza vs número de insertos.

Na Figura 36 é possível observar a influência do desgaste na dureza.

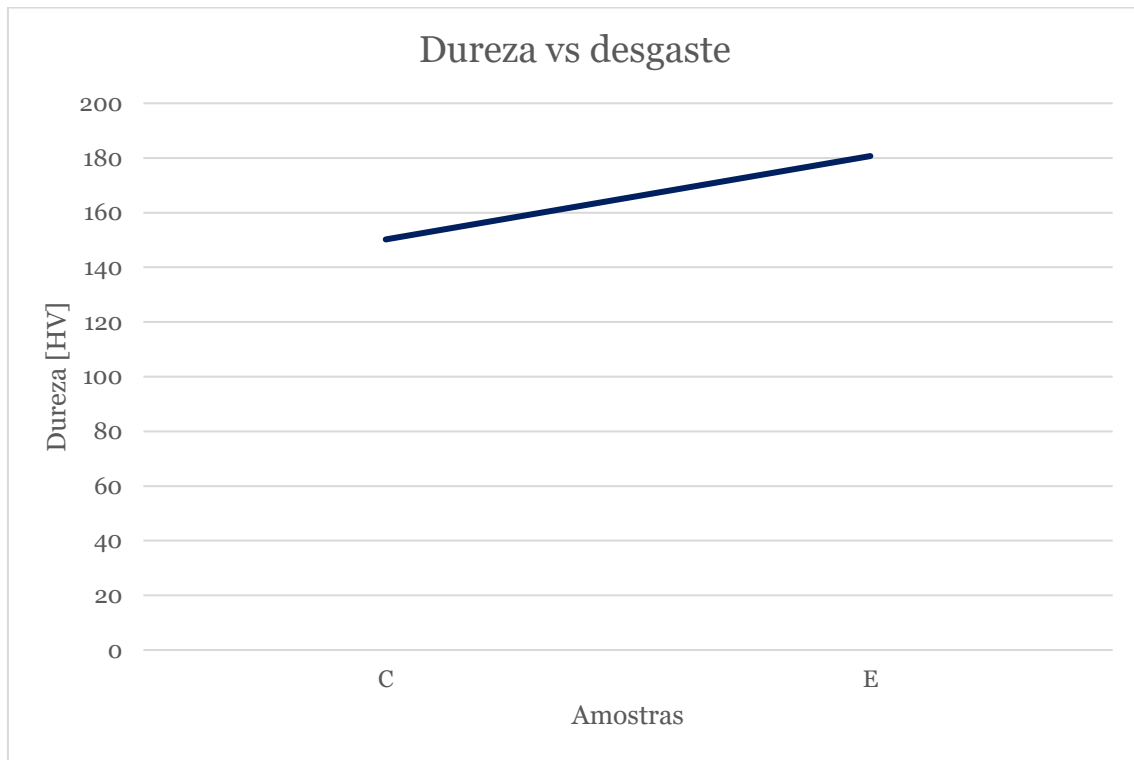


Figura 36 - Relação dureza vs desgaste.

#### 4.2.2. Análise química

As ligas de latão em estudo resultam de um processo de fundição realizado externo à Mepisurfaces. As peças brutas que posteriormente são maquinadas no departamento de Maquinação da Mepisurfaces são adquiridas por parte de um processo de estampagem realizado numa empresa externa ao grupo.

Na Tabela 11 são apresentados os resultados obtidos dos ensaios realizados com o espectrómetro.

Tabela 11 - Resultados análise *Fischerscope*

n	Cu [%]	Zn [%]	Pb [%]
1	58,66	41,33	0,009
2	58,69	41,29	0,018
3	58,73	41,24	0,026
4	58,35	41,62	0,029
5	58,33	41,64	0,031
6	58,27	41,72	0,010
<b>Valores médios</b>	58,50	41,48	0,021
<b>Desvio padrão</b>	0,211	0,210	0,009

Por observação das tabelas anteriormente apresentadas e segundo (Copper Development Association Inc., 2021), conclui-se que o latão maquinado corresponde a *CuZn42*.

O desenho técnico facultado pelo grupo para este componente não indica qualquer obrigatoriedade de uso de uma composição de liga específica. Sendo este um material “sem chumbo”, oferece uma boa performance de maquinagem graças à composição de ligas e à sua microestrutura. Este material apresenta ainda boa formabilidade quer a quente como a frio (Aurubis, n.d.). Esta liga é altamente adequada para peças formadas a quente, especialmente para perfis. Devido à sua mistura heterogénea de fase  $\alpha$  e fase  $\beta$ , é excelente para peças de perfuração (Standard, 1998).

Destes resultados verifica-se que a liga do componente apresenta na sua composição um valor residual de chumbo, cerca de 0.021%. Este sim um fator de obrigatoriedade imposto no desenho técnico, tendo que ser o elemento *Pb* inferior a 300 ppm.

Na Tabela 12 são apresentadas algumas propriedades físicas desta liga à temperatura ambiente.

Tabela 12 - Propriedades físicas liga *CuZn42* à temperatura ambiente (Aurubis, n.d.)

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
<b>Densidade [<math>g/cm^3</math>]</b>	8.4
<b>Condutibilidade elétrica [<math>MS/m</math>]</b>	15
<b>Condutibilidade térmica [<math>W/(m \cdot K)</math>]</b>	109
<b>Capacidade térmica [<math>J/(kg \cdot K)</math>]</b>	377
<b>Coefficiente de expansão térmica <math>10^{-6}/K</math></b>	20.9
<b>Módulo de Young [<math>GPa</math>]</b>	95
<b>Intervalo de fusão [<math>^{\circ}C</math>]</b>	885-900

### 4.2.3. Ensaaios de Maquinagem

Os insertos utilizados são da marca *Kennametal* com revestimento em *PCD*, as características dos mesmos são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Características insertos intercambiáveis (Kennametal, n.d.).

<b>Comprimento [LI]</b>	12,0100
<b>Espessura [S]</b>	3,7500
<b>Largura [W]</b>	6,7500
<b>Comprimento faceta de canto [BS]</b>	2,2600
<b>Raio de canto [<math>R\epsilon</math>]</b>	0,4000
<b>Espessura média de apara [HM]</b>	0,0200
<b>Arestas de corte por inserto</b>	1

Na Figura 37 é representado o inserto utilizado e as respectivas medidas.

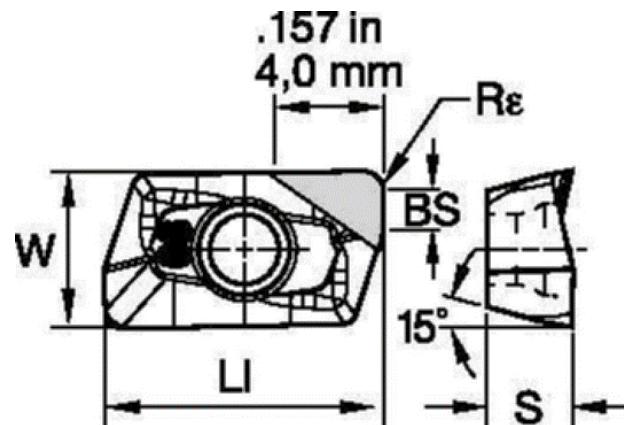


Figura 37 - Medidas inserto intercambiável Kennametal PCD (Kennametal, n.d.).



Figura 38 - Representação da fresa utilizada com três insertos.

A utilização de *PCD* é justificada com uma excelente *performance* deste revestimento na maquinagem de materiais não ferrosos, e obtenção de excelentes acabamentos superficiais.

#### 4.2.4. Rugosidades

Na Tabela 14 e Tabela 15 são apresentados os resultados obtidos das medições, na direção longitudinal e transversal, respectivamente.

Tabela 14 - Valores parâmetros rugosidade na direção longitudinal.

Parâmetros	A	B	C	D	E
<i>Ra</i>	0,125	0,120	0,120	0,120	0,123
<i>RzD</i>	0,700	0,690	0,667	0,650	0,877
<i>RzI</i>	0,730	0,730	0,683	0,673	1,037
<i>RzJ</i>	1,020	1,227	0,983	0,857	1,363
<i>Rmd</i>	0,810	0,753	0,707	0,693	1,100
<i>Rmj</i>	1,120	1,307	1,040	0,893	1,477
<i>Rt</i>	0,840	0,780	0,713	0,707	1,107
<i>Rp</i>	0,410	0,380	0,360	0,340	0,620
<i>Rpm</i>	0,355	0,347	0,327	0,317	0,460
<i>Rq</i>	0,150	0,140	0,140	0,140	0,160
<i>R3z</i>	0,608	0,603	0,600	0,597	0,740
<i>Pt</i>	1,120	1,307	1,040	0,893	1,477

Tabela 15 - Valores parâmetros rugosidade na direção transversal.

Parâmetros	A	B	C	D	E
<i>Ra</i>	0,090	0,100	0,100	0,100	0,127
<i>RzD</i>	0,493	0,620	0,563	0,577	0,850
<i>RzI</i>	0,603	0,650	0,620	0,593	0,967
<i>RzJ</i>	1,007	0,740	0,977	0,713	1,187
<i>Rmd</i>	0,653	0,707	0,640	0,613	1,153
<i>Rmj</i>	1,037	0,790	1,060	0,747	1,430
<i>Rt</i>	0,693	0,747	0,680	0,627	1,187
<i>Rp</i>	0,313	0,393	0,353	0,307	0,727
<i>Rpm</i>	0,220	0,323	0,287	0,270	0,463
<i>Rq</i>	0,117	0,120	0,123	0,120	0,157
<i>R3Z</i>	0,367	0,510	0,453	0,490	0,617
<i>Pt</i>	1,037	0,790	1,060	0,747	1,430

De seguida, são apresentados todos os parâmetros em análise para melhor compreensão do efeito da direção na rugosidade da Figura 39 à Figura 45.

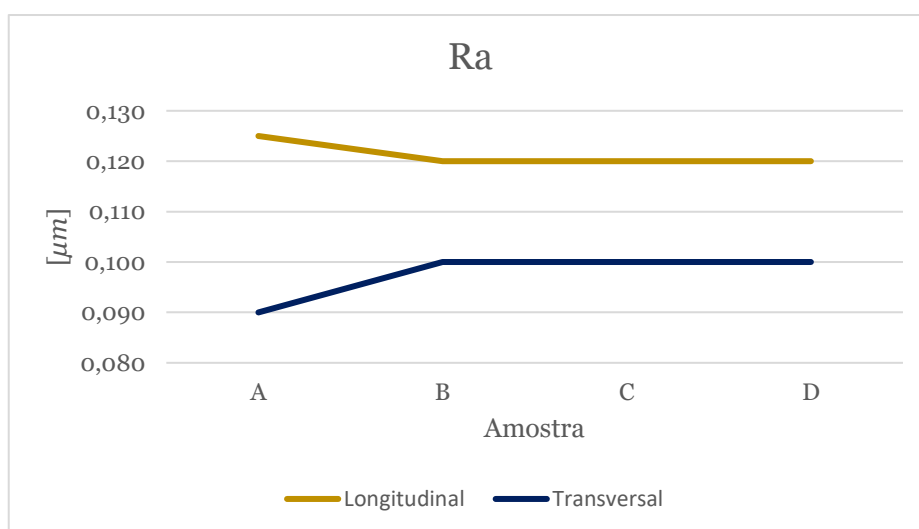


Figura 39 - Parâmetro da rugosidade Ra, na direção longitudinal e transversal.

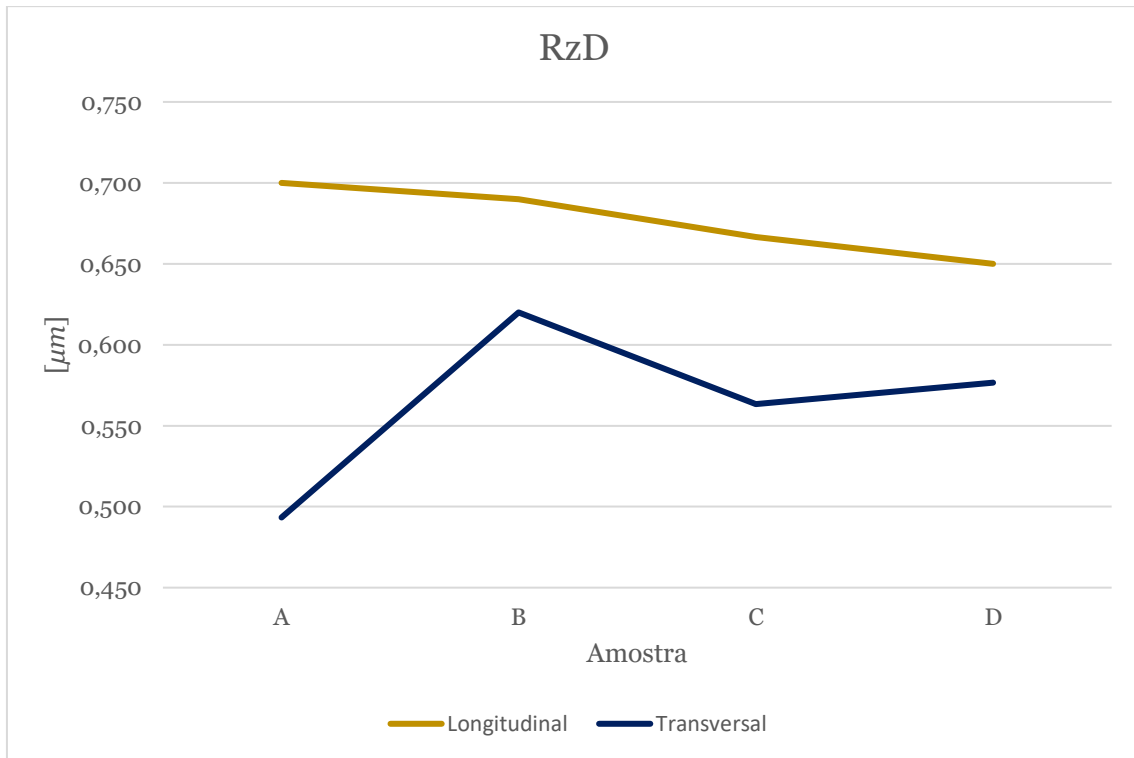


Figura 40 - Parâmetro da rugosidade RzD, na direção longitudinal e transversal.

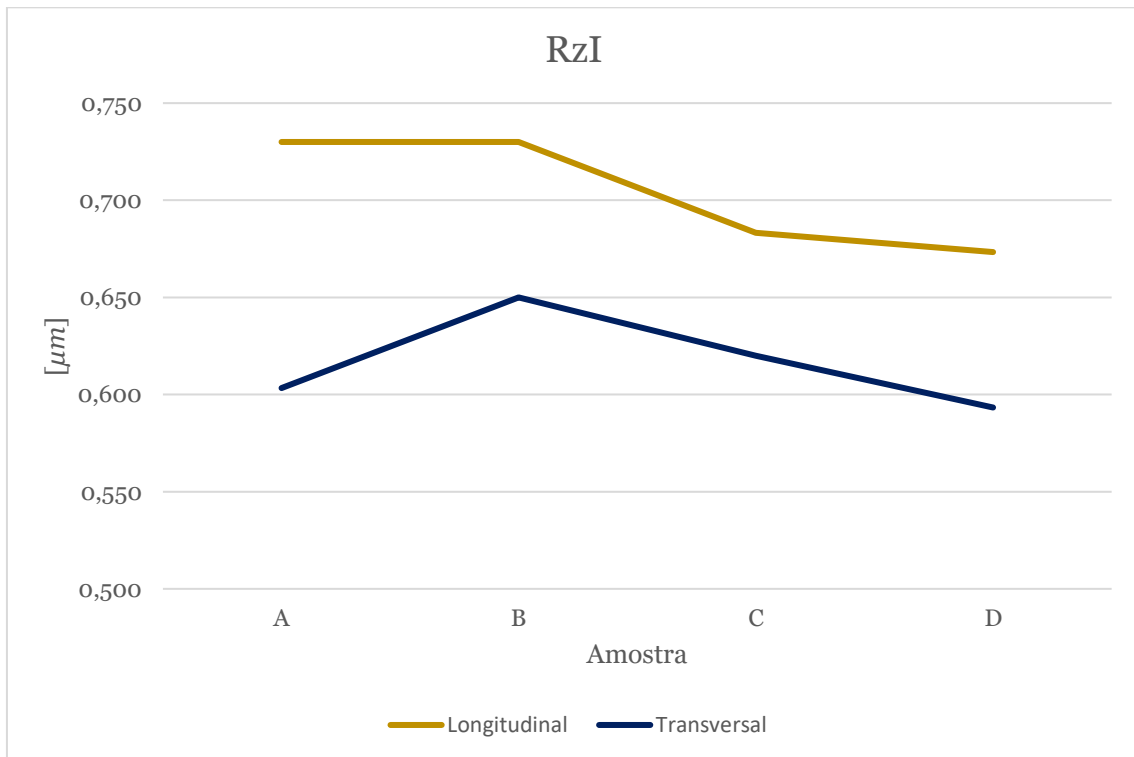


Figura 41 - Parâmetro da rugosidade RzI, na direção longitudinal e transversal.

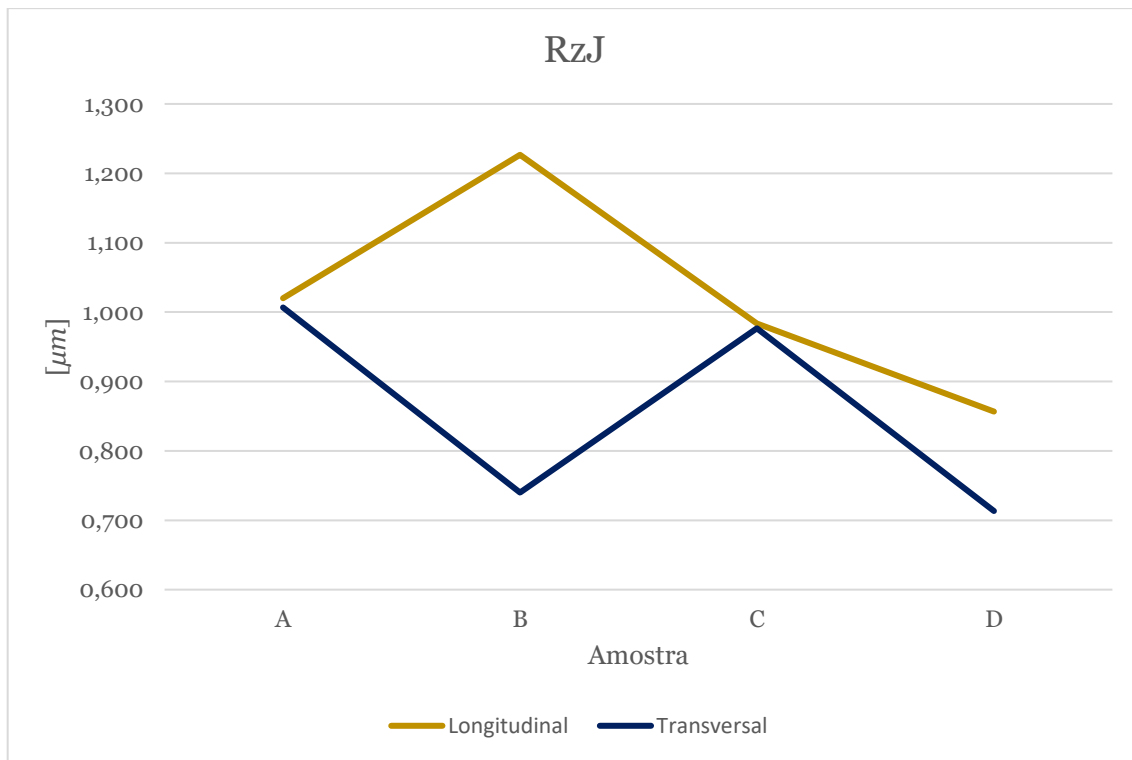


Figura 42 - Parâmetro da rugosidade RzJ, na direção longitudinal e transversal.

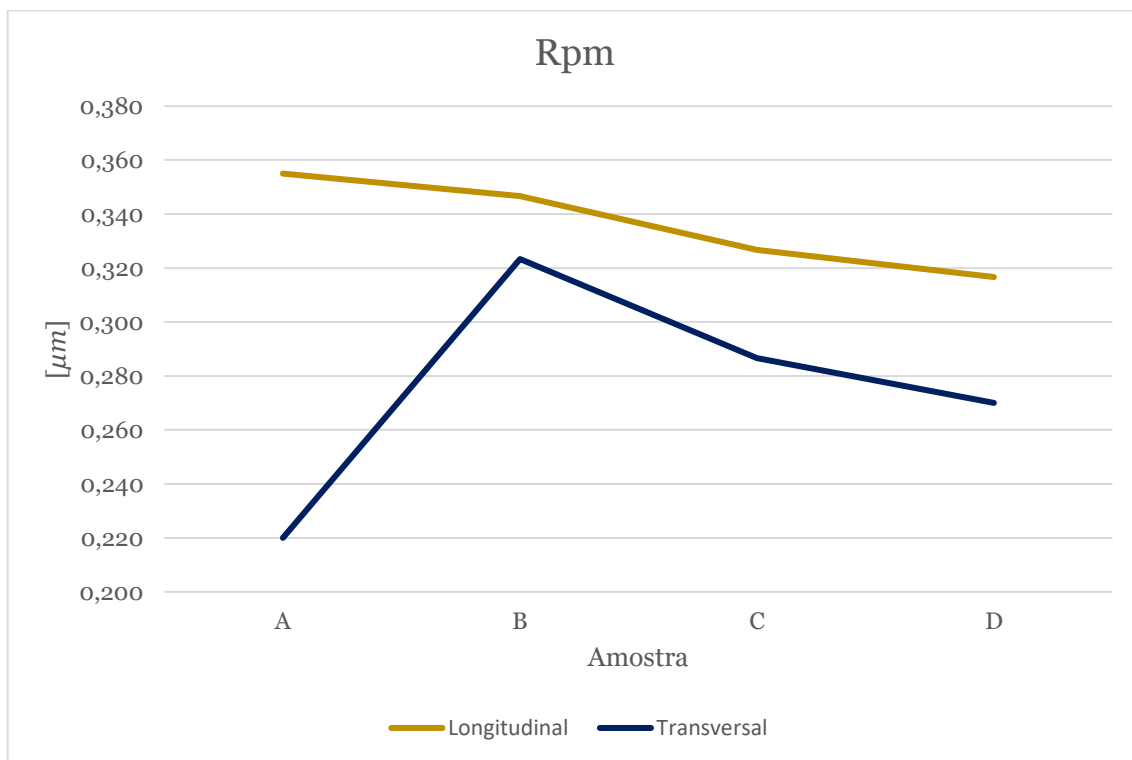


Figura 43 - Parâmetro da rugosidade Rpm, na direção longitudinal e transversal.

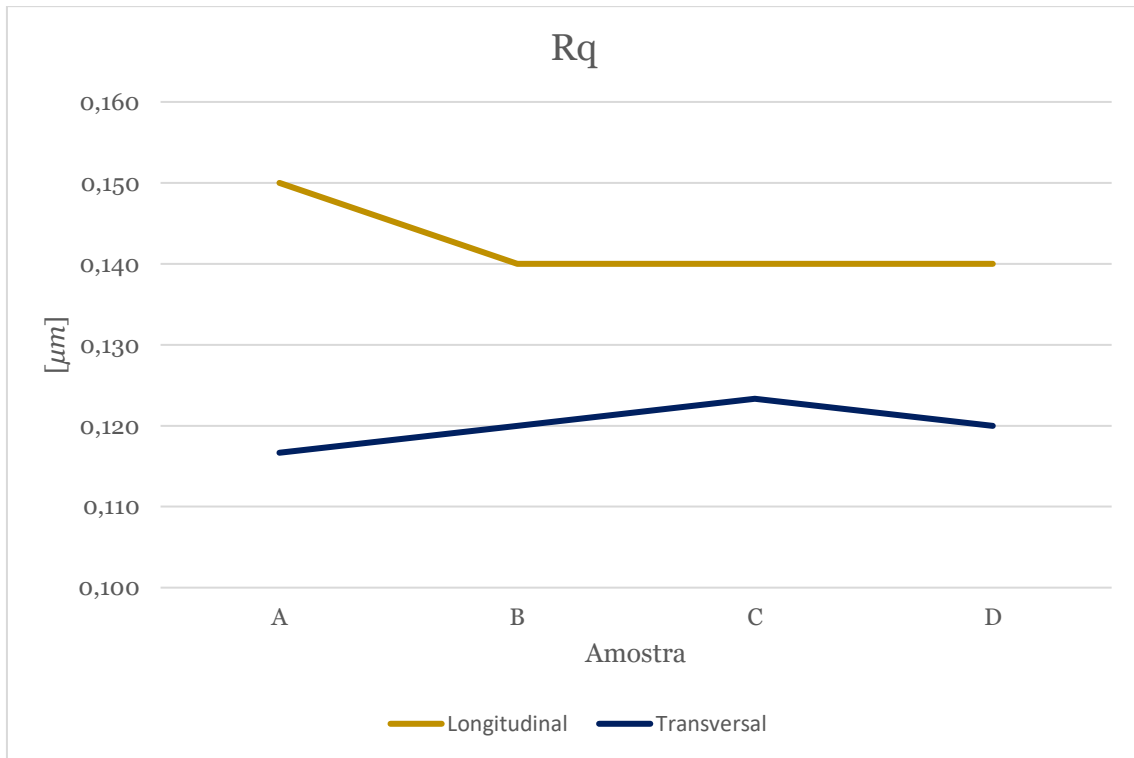


Figura 44 - Parâmetro da rugosidade Rq, na direção longitudinal e transversal.

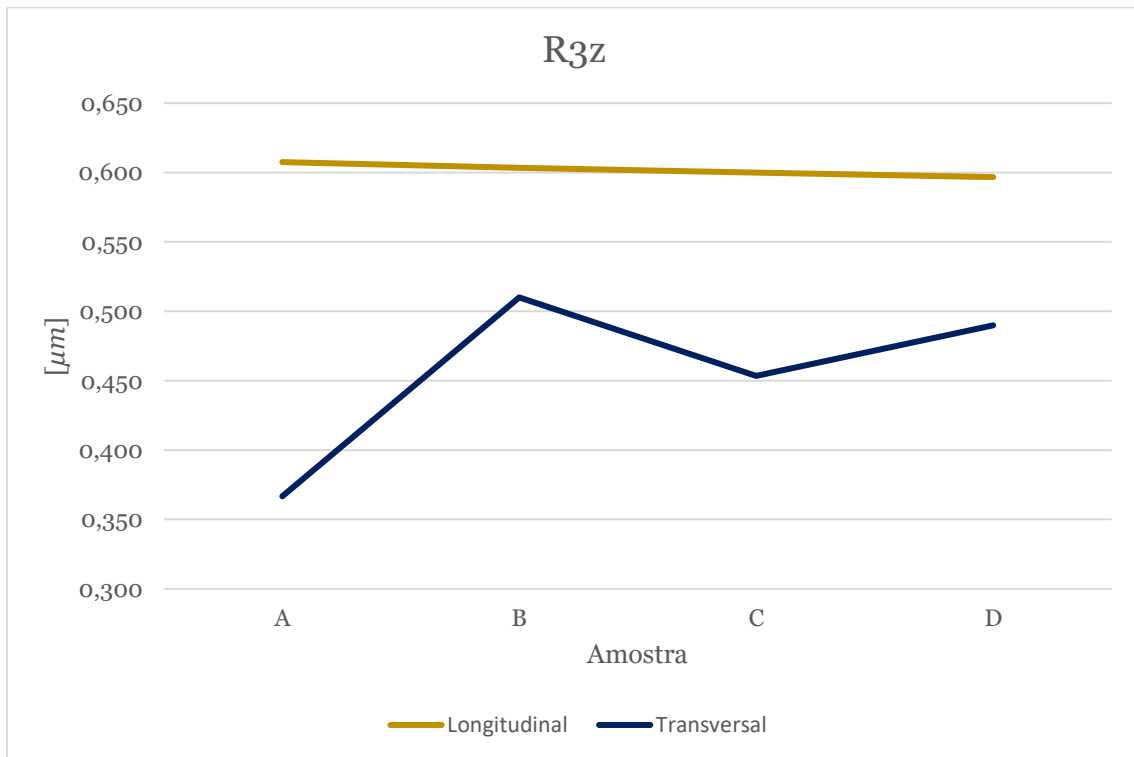


Figura 45 - Parâmetro da rugosidade R3z, na direção longitudinal e transversal.

De seguida, torna-se importante observar e compreender a influência do número de insertos intercambiáveis. Desta forma, apresenta-se a Figura 46 e Figura 47.

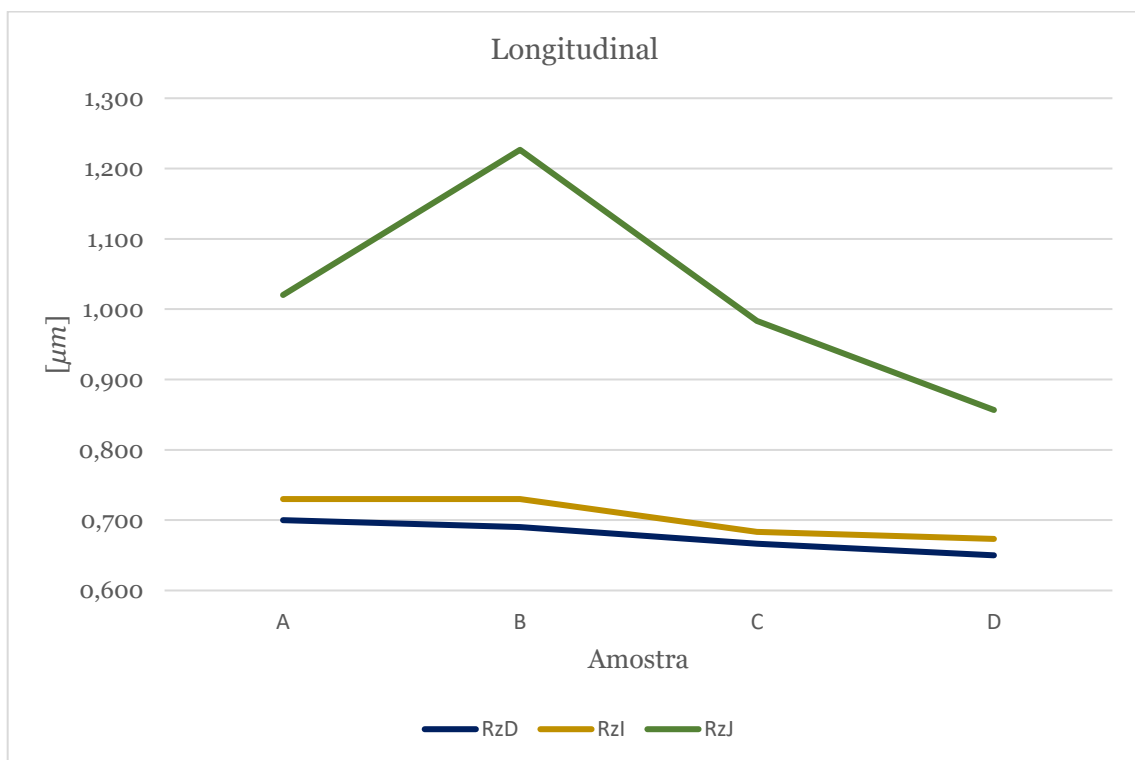
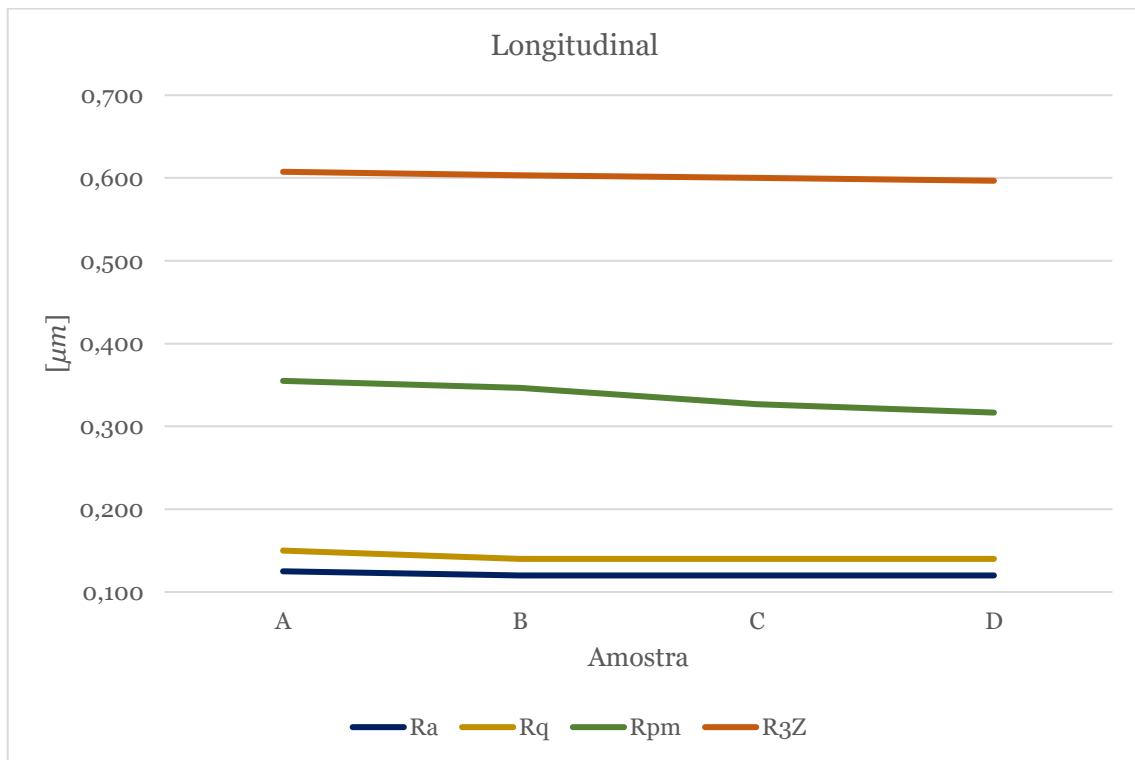


Figura 46 - Influência do número de insertos nos parâmetros da rugosidade na direção longitudinal.

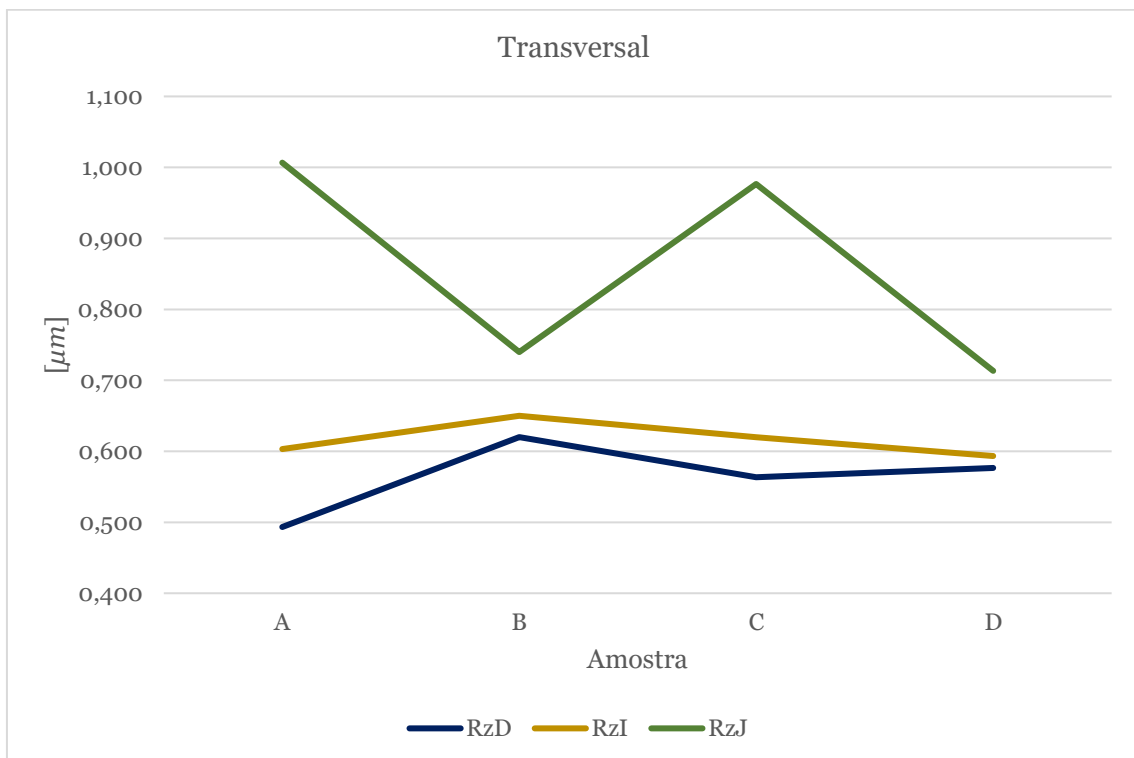
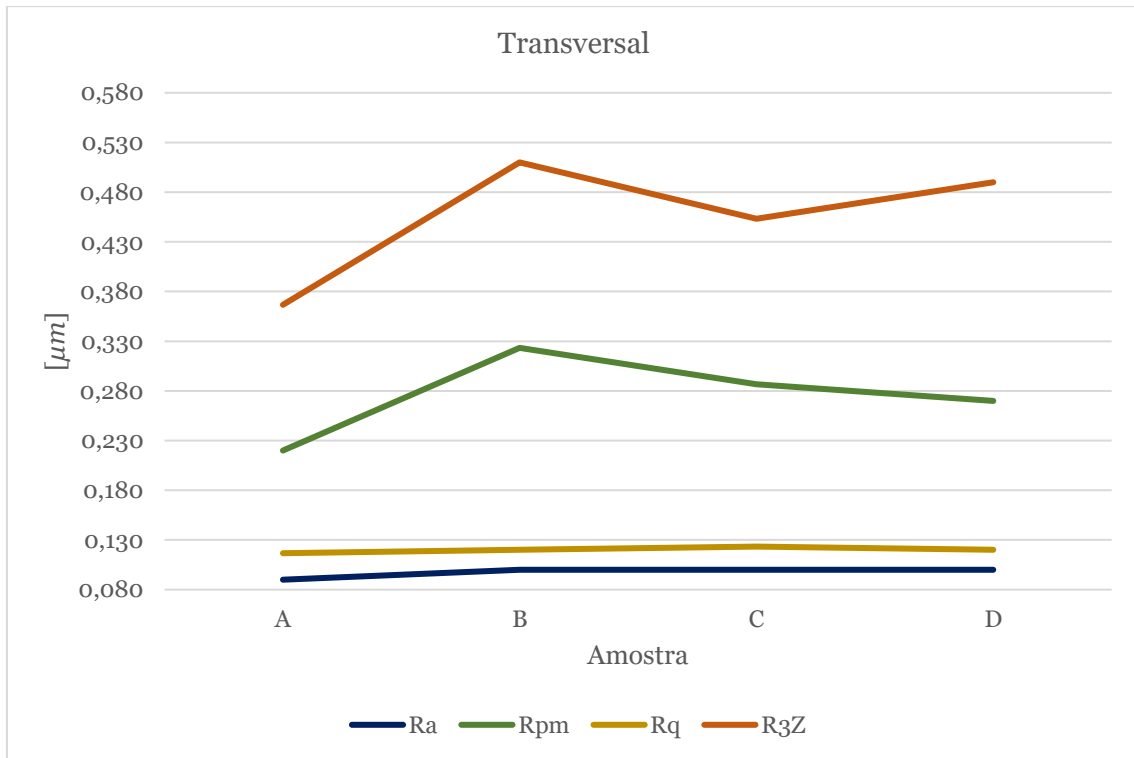


Figura 47 - Influência do número de insertos nos parâmetros da rugosidade na direção transversal.

No que diz respeito à influência do desgaste dos insertos, é observado na Figura 48 e Figura 49 os parâmetros da rugosidade para insertos sem qualquer tipo de desgaste e insertos com desgaste.

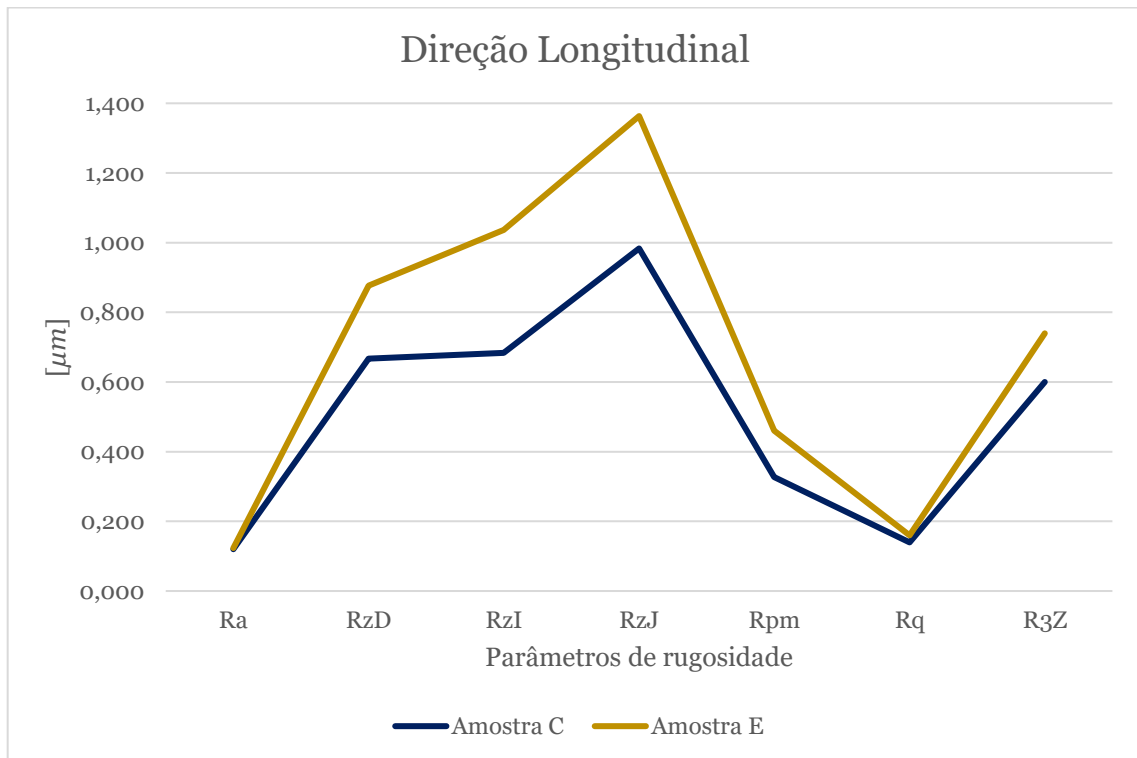


Figura 48 - Efeito do desgaste na direção longitudinal.

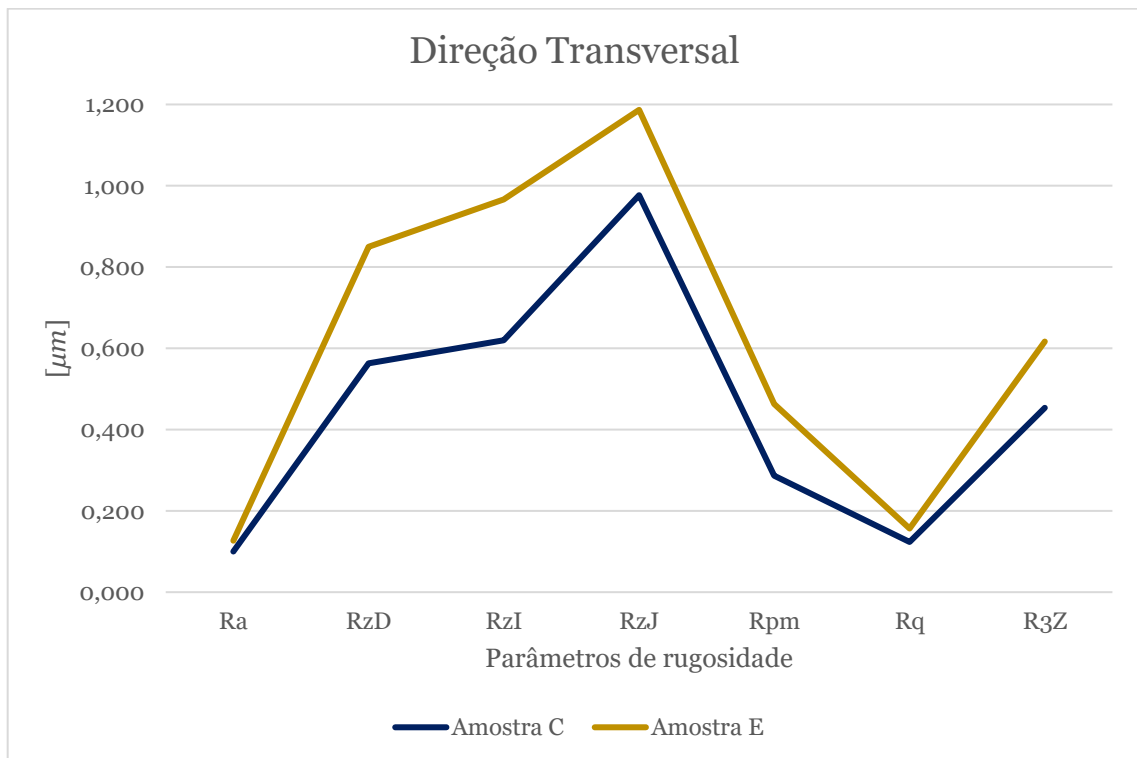


Figura 49 - Efeito do desgaste na direção transversal.

No que à direção diz respeito, o efeito da mesma é visível, na direção longitudinal obtêm-se os maiores valores de rugosidade. A existência de “estrias” provocadas pelos insertos explica a diferença de valores entre as duas direções.

No que ao efeito do número de insertos diz respeito, na direção longitudinal verifica-se uma ligeira descida dos valores, mas sem expressão significativa. Em sentido oposto, na direção transversal verifica-se uma ligeira subida de valores, mas também sem expressão. Observa-se uma anomalia na amostra B.

O efeito do desgaste é bem visível nos valores dos parâmetros da rugosidade, provocando um aumento dos valores medidos.

## 5. Conclusões

O trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação permitiu compreender melhor a maquinabilidade das ligas do latão, em especial com ferramentas em *PCD*, sendo também possível perceber o efeito das mesmas na maquinabilidade deste material.

Com equações previamente expostas, é possível determinar alguns parâmetros de corte:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 32 \cdot 10200}{1000} = 1025,416 \text{ m/min} \quad [14]$$

Calculando o avanço por dente como apresentado em [ 15 ], é possível apresentar o avanço por dente correspondente às diferentes amostras na Tabela 16.

$$f_z = \frac{v_f}{z \cdot n} \text{ [mm/dente]} \quad [15]$$

A título de exemplo, em [ 16 ] é apresentado o cálculo do avanço por dente da amostra A.

$$f_z = \frac{v_f}{z \cdot n} = \frac{500}{4 \cdot 10200} = 0,0123 \text{ mm/dente} \quad [16]$$

Tabela 16 - Avanço por dente das diversas amostras.

AMOSTRA	AVANÇO POR DENTE [mm/dente]
A	0,0123
B	0,0163
C	0,0245
D	0,0490

Desta forma é possível calcular o avanço por rotação, utilizando [ 17 ].

$$f_n = f_z \cdot z \quad [17]$$

Sendo então o avanço por rotação calculado da seguinte forma, como explicito em [ 18 ].

$$f_n = 0,0123 \cdot 4 = 0,0492 \text{ mm} \quad [18]$$

A não existência de alteração quer do avanço, quer da rotação do *spindle* permite-nos concluir que o valor de  $f_n$  é o mesmo para todas as amostras.

Sendo o *MRR* calculado através da equação apresentada em [ 3 ] e com base nos parâmetros supra apresentados e calculados, é possível calcular o mesmo como exposto em [ 19 ].

$$MRR = v_c \cdot a_p \cdot f_n = 1025,416 \cdot 0,03 \cdot 0,0492 = 1,5080 \text{ cm}^3/\text{min} \quad [19]$$

De seguida é calculado o tempo de corte em [ 20 ].

$$T_c = \frac{L}{v_f} = \frac{(49,4 + 32)}{500} = 0,163 \text{ min} = 9,78 \text{ s} \quad [20]$$

Conclui-se que o número de insertos influencia a dureza superficial da peça de forma inversa, sendo a dureza menor com o aumento do número de insertos. É também possível concluir que o desgaste dos insertos tem influência na dureza final da peça, sendo esta tanto maior quanto o aumento do desgaste.

Por observação da Tabela 14 e Tabela 15, especificamente a amplitude máxima da rugosidade ( $Rt$ ), conclui-se que a diminuição da mesma surge com o aumento da dureza do material da superfície (Davim, 2008).

O número de insertos utilizados no processo de desbaste, ao nível dos parâmetros da rugosidade, não figura expressão significativa. Contudo, por base em experiência adquirida e por controlo visual, conclui-se que a utilização de dois insertos é suficiente para alcançar um equilíbrio entre acabamento superficial, *performance* e custos.

Os parâmetros de corte calculados permitem depreender, com base em experiência adquirida, a existência de um equilíbrio e compromisso entre *performance* e custos, como referido anteriormente.

## Bibliografia

- Amaral, L. (2017). *Maquinabilidade de Ligas Cu-Zn e Impacto da Utilização de Ferramentas WC Revestidas em Processo Produtivo*.
- Amaral, M. M., Raele, M. P., Caly, J. P., Samad, R. E., Vieira, Jr., N. D., & Freitas, A. Z. (2009). Roughness measurement methodology according to DIN 4768 using optical coherence tomography (OCT). *Modeling Aspects in Optical Metrology II*, 7390(1), 73900Z. <https://doi.org/10.1117/12.827748>
- Arceo Engineering. (n.d.). *Physical Vapor Deposition ( PVD ) technology ARCEO Engineering*.
- ASM International. (1998). *Metals Handbook* (Vol. 148).
- Association, C. D. (1992). *Cost-effective manufacturing - machining brass, copper & its alloys*.
- Aurubis. (n.d.). *Technical Datasheet - CuZn42*.
- Batista, R. (2010). *Tendências do Corte por Arranque de Apara - Maquinagem*.
- Bayer, A. M., Becherer, B. A., & Vasco, T. (1989). High Speed Tool Steels. *Latrobe Specialty Steel Company*, 16(Ref 2), 10–11.
- Boisse, P., Altan, T., & van Luttervelt, K. (2003). *Friciton & flow stress in forming & cutting* (Vol. 148).
- Boubekri, N., & Shaikh, V. (2012). Machining Using Minimum Quantity Lubrication: A Technology for Sustainability. *International Journal of Applied Science and Technology*, 2(1).
- Brito, G., & Gordo, J. M. (2006). *Tecnologia De Estaleiro*.
- Copper Development Association Inc. (2021). *Application Datasheet Standard Designation for Wrought Copper Alloys*. 72. [www.copper.org](http://www.copper.org)
- Dadić, Z. (2013). Tribological principles and measures to reduce cutting tools wear. In *International conference “Mechanical Technologies and Structural Materials” Split* (Issue September).
- Davim, J. P. (2008). *Princípios da Maquinagem*.
- Davim, J. P., Mendes, J. G., & Baptista, A. M. (2013). *Medição das forças de corte em processos de maquinagem*.
- de Oliveira Guimarães, J. L. (2009). *Estudo de Ferramentas de Corte para Novos Materiais*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- Dinis Correia, H. J. (2009). *O rugosímetro Hommel Tester T1000*.
- Dundas, B. (2001). *PCD Tools Get Tough*.
- Esteves Correia, A. (2005). *António Esteves Correia Uma Abordagem à Maquinagem a Alta Velocidade , com recurso a turbinas pneumáticas de alta rotação António Esteves Correia Uma Abordagem à Maquinagem a Alta Velocidade , utilizando turbinas pneumáticas de alta rotação*.
- Ferraresi, D. (1969). *Fundamentos da Usinagem dos Metais*.
- G.D. Limited. (2013). *CES Edupack 2013*.
- Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., & Davim, J. P. (2008). Selection of optimal MQL and cutting conditions for enhancing machinability in turning of brass. *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1–3), 459–464.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.193>
- Gaurav, G., Sharma, A., Dangayach, G. S., & Meena, M. L. (2020). A Review of Minimum Quantity Lubrication (MQL) Based on Bibliometry. *Current Materials Science*, 14(1), 13–39. <https://doi.org/10.2174/2666145413999201222104811>
- Homem Coimbra, A. R. (2014). *Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica Estudo do processo de maquinagem de ligas de Titânio Resumo*.
- International Standard. (1993). Tool-life testing with single-point turning tools. *International Organization for Standardization*.  
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/11594d7b-fd5c-45d7-816b-8e35fdf4d95/iso-4832-1991>
- International Standard. (1997). *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters* (Vol. 2004).
- International Standard. (2012). *Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges – Designation of the main groups and groups of application*.
- João Manuel R. S. Tavares. (2012). Indicação dos estados de Superfície - Apontamentos de CFAC (Concepção e Fabrico Assistidos por Computador). In *FEUP*.  
[https://myisepipp-my.sharepoint.com/:w:/r/personal/1140701\\_isepp\\_pt/\\_layouts/15/Doc.aspx?source=urcedoc=%7BD3A0398F-584D-4DDD-8C8D-838761A919BD%7D&file=Procedimento experimental.docx&action=default&mobileredirect=true](https://myisepipp-my.sharepoint.com/:w:/r/personal/1140701_isepp_pt/_layouts/15/Doc.aspx?source=urcedoc=%7BD3A0398F-584D-4DDD-8C8D-838761A919BD%7D&file=Procedimento%20experimental.docx&action=default&mobileredirect=true)

- Jung, I., Lubich, V., & Wieland, H.-J. (2002). Tool Failures - Causes and Prevention. *Proceedings of the 6th International Tooling Conference*, 1343–1362.  
[https://www5.kau.se/sites/default/files/Dokument/subpage/2010/02/93\\_1343\\_1362\\_pdf\\_76008.pdf](https://www5.kau.se/sites/default/files/Dokument/subpage/2010/02/93_1343_1362_pdf_76008.pdf)
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2016). *Manufacturing Processes for Engineering Materials* (6th ed.).
- Kang, M. C., Tak, H. S., Jeong, Y. K., Lee, H. W., & Kim, J. S. (2010). Properties and tool performance of ta-C films deposited by double-bend filtered cathodic vacuum arc for micro drilling applications. *Diamond and Related Materials*, 19(7–9), 866–869.  
<https://doi.org/10.1016/j.diamond.2010.02.002>
- Kennametal. (n.d.). *Insertos para Mill 1-10™ • EDCT-PCD*.  
<https://www.kennametal.com/pt/pt/products/p.insertos-para-mill-1-10-edct-pcd.3759083.html>
- Klocke, F., Lung, D., Gerschwiler, K., Vogtel, P., Cordes, S., & Niehaus, F. (2010). Recommended machining parameters for copper and copper alloys. *DKI Monograph i.18, i.18*, 1–64.
- Kratochvil, R. (2004). *Fresamento De Acabamento Em Altas Velocidades De Corte Para Eletrodos De Grafita Industrial*. 1–119.
- Laakso, S. V. A., Johansson, J., Johansson, D., Schultheiss, F., & Ståhl, J. E. (2019). Multi-objective testing of different brass alloy components for DFM. *Procedia CIRP*, 81, 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.023>
- Lugscheider, E., Knotek, O., Zimmermann, H., & Hellmann, S. (1999). Investigation of the mechanical and structural properties of Ti-Hf-C-N arc PVD coatings. *Surface and Coatings Technology*, 116–119, 239–243. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00115-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00115-2)
- Mepisurfaces, L. (2020). *Manual de Acolhimento*. 31.
- Mikell P. Groover. (2020). Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems Seventh Edition. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). <http://www.elsevier.com/locate/scp>
- MoldMaking Technology. (2017). *Laser-Cutting PCD Tools*.  
<https://www.moldmakingtechnology.com/articles/laser-cutting-pcd-tools>
- Moulin, D., Raymond, O., Chevrier, P., Lipiński, P., & Barre, T. (2006). CVD Diamond Coatings for Machining. *Materials Science Forum*, 526(August 2014), 55–60.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.526.55>

- Muhamad, S. S., Ghani, J. A., Juri, A., & Haron, C. H. C. (2019). Dry and cryogenic milling of aisi 4340 alloy steel. *Jurnal Tribologi*, 21(June), 1–12.
- Nobel, C., Hofmann, U., Klocke, F., Veselovac, D., & Puls, H. (2015). Application of a new, severe-condition friction test method to understand the machining characteristics of Cu-Zn alloys using coated cutting tools. *Wear*, 344–345, 58–68.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.10.016>
- Nobel, C., Klocke, F., Lung, D., & Wolf, S. (2014). Machinability enhancement of lead-free brass alloys. *Procedia CIRP*, 14(September), 95–100.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.018>
- Pantazopoulos, G. (2003). A review of defects and failures in brass rods and related components. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 3(4), 14–22.  
<https://doi.org/10.1007/bf02715925>
- Peng, Z. (2017). *An in situ kinetic investigation of the selective dissolution mechanism of Cu alloys*.
- Pinho de Jesus, A. M. (2015). *Processos de Fabrico I - Documentos de Apoio*.
- Pinho de Jesus, A. M. (2019). Fundamentos do Corte: Teoria e Exercícios. In *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*.
- Podany, P., & Slama, P. (2014). Free machining brasses with minimized lead content. *Materials Science Forum*, 782(April), 421–426.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.782.421>
- Pritchard, P. J., & Mitchell, J. W. (2020). Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics. In *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- Quinta, R. (2018). *Maquinabilidade de componentes de latão com ferramentas em PCD*.
- Sandvik Coromant. (n.d.). *Problemas e soluções em torneamento*.  
<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general-turning/pages/troubleshooting.aspx>
- Schultheiss, F., Johansson, D., Linde, M., Tam, P. L., Bushlya, V., Zhou, J., Nyborg, L., & Ståhl, J. E. (2016). Machinability of CuZn21Si3P brass. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 32(17), 1744–1750.  
<https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1189199>
- Shin, T. J., Oh, J.-O., Oh, K. H., & Lee, D. N. (2004). The mechanism of abnormal grain growth in polycrystalline diamond during high pressure-high temperature sintering. *Diamond and Related Materials*, 13, 488–494.

- Soares, R. (2016). Estudos de Maquinabilidade da Liga AlSi9Cu3 Recorrendo a Ferramentas PCD com Quebra-Aparas. *Departamento de Engenharia Mecânica*, 186.
- Standard, B. (1998). *Copper and copper alloys D Copper*. 42(Of 2157), 757–785.
- Taha, M. A., El-Mahallawy, N. A., Hammouda, R. M., Moussa, T. M., & Gheith, M. H. (2012). Machinability characteristics of lead free-silicon brass alloys as correlated with microstructure and mechanical properties. *Ain Shams Engineering Journal*, 3(4), 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2012.05.004>
- Thin Film Advanced Technologies. (n.d.). *PVD coating characterization*.
- Toufatzis, A. I., Pantazopoulos, G. A., Besseris, G. J., & Paipetis, A. S. (2016). Machinability evaluation and screening of leaded and lead-free brasses using a non-linear robust multifactorial profiler. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(9–12), 3241–3254. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8435-5>
- Unist. (n.d.). *What is a minimum or micro lubrication system?* <https://unist.com/what-we-do/mql-overview.html>
- Vaghefpour, H., Dahar, A., & Zabeh, K. (2015). Effect of Cutting Parameters on Tool Life: Case Study Twist Drill. *Advanced Materials Research*, 1101(6), 397–401. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1101.397>
- Vanat, K. J., & Braghini, A. (2014). O Uso De Ferramentas De Metal Duro No Torneamento Do Nylon. *Tecnologia Em Metalurgia Materiais e Mineração*, 11(1), 50–57. <https://doi.org/10.4322/tmm.2014.007>
- Vandenbulcke, L., & Herbin, R. (1984). Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition of Boron. *Proceedings - The Electrochemical Society*, 84–6, 639–648.
- Wilborna, M. M., Vecchia, F. D., Mozetica, H., Schneider, E. L., Oliveira, C. T., & Schaeffer, L. (2013). Influência do tratamento térmico no empenamento de latão durante o processo de usinagem por fresamento de topo. *Ciencia e Tecnologia Dos Materiais*, 25(1), 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.ctmat.2013.12.002>