



Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

***Definição de Parâmetros de Utilização para  
Ferramentas de Corte com Insertos PCD***

**Tiago Batista Neves**

Leiria, *Março* de 2017





Projeto

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

***Definição de Parâmetros de Utilização para  
Ferramentas de Corte com Insertos PCD***

**Tiago Batista Neves**

Projeto de Mestrado realizada sob a orientação da Doutora Maria Leopoldina Alves, Professora da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e do Doutor Mário Correia Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, *Março* de 2017



# Dedicatória

---

Dedico este trabalho à minha família, em especial a meus pais e irmã pelo apoio e compreensão demonstrados nesses anos de estudo.



# Agradecimentos

---

Na vida conhecemos pessoas que nos marcam para sempre, umas pela positiva outras pela negativa. No meu caso tenho a sorte de ter pessoas perto de mim que me ajudam e que me dão força para alcançar tudo aquilo que quero. Uma das coisas mais importantes e que estou a terminar agora é o meu mestrado, mas para isso ainda me falta a entrega e respetiva apresentação da tese. Para a realização desta contei com várias pessoas que me ajudaram e a quem quero agradecer:

- Aos professores Maria Leopoldina Alves e Mário Correia, meus orientadores da tese de mestrado, que me ajudaram e orientaram durante toda a realização da tese. Tanto na parte de pesquisa bibliográfica como na parte prática;
- À empresa Araújo & Silva, Lda, que me recebeu, sempre que necessário, para a recolha das ferramentas;
- Ao Instituto Politécnico de Leiria, em particular à Escola Superior de Tecnologia e Gestão, que disponibilizou o Laboratório de Engenharia Mecânica e todos os equipamentos necessários.
- A toda a minha família (pais, irmã, cunhado, tios, primos e avós) e a todos os meus amigos pelo apoio e força que me deram ao longo deste último ano para que conseguisse realizar a tese.



# Resumo

---

O trabalho tem como objetivo a análise do comportamento de ferramentas de corte com insertos de diamante policristalino, utilizadas para a maquinação da grafite. Pretendeu-se comparar o comportamento de diferentes tipos de diamante policristalino e geometria de corte de modo a otimizar o rendimento deste tipo de ferramenta. Os PCD's utilizados para comparação foram CTB010, CTH025 e CTM302, cujas diferenças se centravam no tipo de grão. Para a realização do projeto foram fabricadas na empresa Araújo & Silva dezoito ferramentas. Este número de ferramentas foi obtido através da técnica do DOE, onde foram considerados os principais parâmetros de corte.

Através da realização do trabalho foi possível concluir que o PCD do tipo CTH 0 25 permite mais horas de maquinação do que os outros PCD's utilizados no entanto o PCD CTB 0 10 permite uma melhor qualidade de acabamento. Além disso, podemos concluir que ao utilizar parâmetros de corte, como o avanço, a velocidade de corte e a rotação, mais baixos é possível aumentar a vida útil das ferramentas.

*Palavras-chave: Ferramenta de corte; Diamante policristalino; Grafite; Maquinação; Insertos.*



# Abstract

---

The purpose of this work is to analyse the behaviour of the cutting tools with inserts of polycrystalline diamonds, used for the machining of graphite. It was intended to compare the behaviour of different types of polycrystalline diamonds and the cut geometry. This way the performance of this kind of tools could be optimized. The PCD's used for comparison were CTB010, CTH025 and CTM302, whose differences were centred in the group of the grain. For the completion of this project eighteen tools were manufactured in Araújo & Silva's company. This amount of tools was obtained through the DOE's technique, where the main parameters of cut were taken into consideration.

By performing the work it was possible to conclude that the CTH 0 25 type PCD allows more machining hours than the other PCDs used, however the PCD CTB 0 10 allows a better finishing quality. In addition, we can conclude that using cutting parameters, such as feed, cutting speed and rotation, lower tool life can be increased.

*Keywords: Cut tool; Polycrystalline diamond; Graphite; Machining; Inserts.*



# Lista de figuras

---

Figura 1 Estrutura da grafite fornecendo a distância entre os planos (eixo c) e a distância entre os átomos de carbono vizinhos: esquerda, grafite hexagonal; direita, grafite romboédrica. [1].....	4
Figura 2 Etapas de fabricação da grafite industrial [3].....	5
Figura 3 Fratura das arestas decorrente da maquinação [4].....	10
Figura 4 Formação da apara [7].....	12
Figura 5 Regiões de deformação da apara [7].....	13
Figura 6 Representação das formas da apara, norma ISO 3685 [7].....	15
Figura 7 Ilustração dos tipos de apara em função da profundidade de corte (ap) e a velocidade de avanço (fn) [7].....	15
Figura 8 Fresas de corpo sólido com diferentes características geométricas [7].....	17
Figura 9 Exemplos de alguns tipos de fresas de corpo sólido e porta-pastilhas [10].....	18
Figura 10 Rocas realizando o facejamento [10].....	18
Figura 11 Fresas de Topo Raso [10].....	19
Figura 12 Fresas de Topo esférico [10].....	19
Figura 13 Fresagem com Fresa de Topo esférico [10].....	19
Figura 14 (a) Estrutura cúbica de face centrada dos átomos de carbono no diamante; (b) e configuração macroscópica de um cristal de diamante [13].....	23
Figura 15 Desgaste da face de saída [22].....	31
Figura 16 Desgaste da cratera [22].....	31
Figura 17 Micro – ruturas [22].....	33
Figura 18 Ruturas [22].....	32
Figura 19 Deformação plástica [22].....	32
Figura 20 Fissuras da aresta de corte [22].....	33
Figura 21 Rutura térmica [22].....	33
Figura 22 Rebaixo [22].....	33
Figura 23 Rutura da apara postíça de corte [22].....	33
Figura 24 Desgaste da face de saída / rutura [22].....	34
Figura 25 Desgaste da cratera / rutura [22].....	34
Figura 26 Mecanismos de desgaste [21].....	35
Figura 27 Abertura de rasgos no buril de suporte [23].....	38
Figura 28 Processo de corte dos insertos por WEDM [23].....	38
Figura 29 Processo de brasagem forte por indução [25].....	39
Figura 30 Processo de conceção do perfil de corte (EDM) [23].....	39

Figura 31 Processo de medição final [23].....	40
Figura 32 Resultado final das ferramentas [23] .....	40
Figura 33 Esquema da abordagem para a aplicação do DOE [28] .....	42
Figura 34 Parâmetros de maquinação recomendados para PCD.....	45
Figura 35 Microscópio ótico Zeiss MC80 [22] .....	48
Figura 36 Suporte de fixação das ferramentas .....	48
Figura 37 Esquema da vista frontal .....	49
Figura 38 Esquema da vista lateral .....	49
Figura 39 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 04 M 02.....	52
Figura 40 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 04 M 02.....	53
Figura 41 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 04 M 05.....	55
Figura 42 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 04 M 05.....	55
Figura 43 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 04 M 06.....	56
Figura 44 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 04 M 06.....	57
Figura 45 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 04 M 08.....	58
Figura 46 Desgaste o inserto nº 2 da ferramenta 04 M 08.....	59
Figura 47 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 12 M 01.....	60
Figura 48 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 12 M 01.....	60
Figura 49 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 12 M 02.....	62
Figura 50 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 12 M 02.....	62
Figura 51 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 12 M 03.....	64
Figura 52 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 12 M 03.....	64
Figura 53 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 12 M 04.....	66
Figura 54 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 12 M 04.....	66
Figura 55 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 12 M 05.....	67
Figura 56 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 12 M 05.....	68
Figura 57 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 12 M 07.....	69
Figura 58 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 12 M 07.....	70
Figura 59 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 8 M 01.....	71
Figura 60 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 8 M 01.....	72
Figura 61 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 8 M 02.....	73
Figura 62 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 8 M 02.....	73
Figura 63 Gráfico Tempo / Ferramentas.....	77
Figura 64 Gráfico Tempo / Tipo de PCD .....	78
Figura 65 Gráfico Tempo / Velocidade de Corte para Ferramentas com 12 mm de Diâmetro .....	79
Figura 66 Gráfico Tempo / rotação para Ferramentas com 12 mm de Diâmetro .....	80

Figura 67 Tempo / Fz para Ferramentas com Diâmetro de 12mm e CTH como tipo de PCD.....	80
Figura 68 Tempo / Fz para Ferramentas com Diâmetro de 12mm e CTB como tipo de PCD.....	81



## Lista de tabelas

---

Tabela 1 Propriedades dos materiais para ferramentas [7] .....	21
Tabela 2 Valores dos expoentes x e y [18] .....	26
Tabela 3 Valores de $C_v$ para as ferramentas de aço – rápido (AR) e metal – duro (MD) [18] .....	27
Tabela 4 Valores dos expoentes i, g e y para as ferramentas de aço – rápido e metal – duro [18] .....	28
Tabela 5 Definição dos parâmetros para aplicação .....	45
Tabela 6 Aplicação do método DOE .....	47
Tabela 7 Comparação dos três tipos de PCD [31] .....	50
Tabela 8 Parâmetros de maquinação da ferramenta 04 M 01 .....	51
Tabela 9 Parâmetros de maquinação da ferramenta 04 M 02 .....	52
Tabela 10 Parâmetros de maquinação da ferramenta 04 M 03 .....	53
Tabela 11 Parâmetros de maquinação da ferramenta 04 M 04 .....	54
Tabela 12 Parâmetros de maquinação da ferramenta 04 M 05 .....	54
Tabela 13 Parâmetros de maquinação da ferramenta 04 M 06 .....	56
Tabela 14 Parâmetros de maquinação da ferramenta 04 M 07 .....	57
Tabela 15 Parâmetros de maquinação da ferramenta 04 M 08 .....	58
Tabela 16 Parâmetros de maquinação da ferramenta 12 M 01 .....	59
Tabela 17 Parâmetros de maquinação da ferramenta 12 M 02 .....	61
Tabela 18 Parâmetros de maquinação da ferramenta 12 M 03 .....	63
Tabela 19 Parâmetros de maquinação da ferramenta 12 M 04 .....	65
Tabela 20 Parâmetros de maquinação da ferramenta 12 M 05 .....	67
Tabela 21 Parâmetros de maquinação da ferramenta 12 M 06 .....	68
Tabela 22 Parâmetros de maquinação da ferramenta 12 M 07 .....	69
Tabela 23 Parâmetros de maquinação da ferramenta 12 M 08 .....	70
Tabela 24 Parâmetros de maquinação da ferramenta 8 M 01 .....	71
Tabela 25 Parâmetros de maquinação da ferramenta 8 M 02 .....	72
Tabela 26 Resumo do percurso das ferramentas .....	75



# Lista de siglas

---

- PCD – Diamante policristalino (*Polycrystalline Diamond*)
- WEDM – Eletroerosão por fio (*Wire Electric Discharge Machining*)
- EDM – Eletroerosão (*Electric Discharge Machining*)
- HSS – Aço rápido
- C – Carbonetos sinterizados
- CG - Carbonetos sinterizados revestidos
- CT – Cermet
- CC – Cerâmica
- CBN – Nitreto de boro cúbico
- TSP – Diamante policristalino termo estável
- HPHT – Alta pressão e alta temperatura (*High-pressure, High-temperature*)
- CVD – Deposição de vapor químico (*Chemical Vapor Deposition*)
- GFK – Fibra de vidro
- CFK – Fibra de carbono
- CNC – Controlo Numérico Computorizado (*Computer Numeric Control*)
- DOE – Desenho de Experiências



# Lista de símbolos

---

$\theta$  – Ângulo de corte

$P_{sh}$  – Plano de corte

$H_{ch}$  – Apara deformada

$H_D$  – Apara não deformada

$\gamma_n$  – Ângulo de ataque

$V_c$  – Velocidade de corte

$D$  – Diâmetro da ferramenta

$N$  – Velocidade de rotação (nº de rotações por minuto)

$V_f$  – Velocidade de avanço

$f_z$  – Avanço por dente ou aresta de corte

$Z$  – Número de dentes ou aresta de corte da apara

$f$  – Avanço por revolução

$a_p$  – Profundidade de corte axial

$a_e$  – Profundidade de corte radial

$V$  – Volume de material removido



# Índice

---

<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XV</b>
<b>LISTA DE SIGLAS</b>	<b>XVII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>XIX</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>XXI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. ESTADO DA ARTE</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Grafite</b>	<b>3</b>
2.1.1. Obtenção da Grafite	4
2.1.2. Tipos e Características da Grafite	6
2.1.3. Maquinação por Eletroerosão	8
<b>2.2. Corte por Arranque da Apara</b>	<b>10</b>
2.2.1. Formação da Apara	11
2.2.2. Tipos de Apara	13
2.2.3. Parâmetros de Corte	15
<b>2.3. Ferramentas</b>	<b>17</b>
2.3.1. Materiais das Ferramentas de Corte	20
2.3.2. Diamante	22
2.3.3. Vida das Ferramentas	25
<b>3. MATERIAIS E METODOLOGIA</b>	<b>36</b>
<b>3.1. Produção de Ferramentas</b>	<b>37</b>
<b>3.2. Definição do Número de Ferramentas (DOE)</b>	<b>40</b>
<b>3.3. Materiais Utilizados - Tipos de PCD</b>	<b>50</b>
<b>4. RESULTADOS OBTIDOS</b>	<b>51</b>
<b>5. ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>75</b>
<b>6. CONCLUSÃO</b>	<b>83</b>
<b>TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>85</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>87</b>
<b>GLOSSÁRIO</b>	<b>91</b>



# 1. Introdução

---

Os processos tecnológicos de maquinação sempre possuíram, de entre os demais processos de fabrico, uma importância significativa para a sociedade económico - industrial devido ao facto de estarem envolvidos na produção direta da generalidade dos bens de consumo, ou indiretamente no fabrico de ferramentas e/ou equipamentos utilizados noutros processos produtivos. A característica mais marcante dos processos de maquinação está relacionada com a elevada flexibilidade com que permitem a obtenção de geometrias complexas e/ou esbeltas com elevada precisão numa gama alargada de materiais (por ex. metais, polímeros ou cerâmicos). No entanto, e apesar da importância económica e tecnológica, os processos de maquinação continuam a ser dos menos compreendidos, devido possivelmente a dificuldades na compreensão do mecanismo de formação de apara.

O paradoxo da evolução das ferramentas de corte está na criação de uma ferramenta com elevada rigidez e tenacidade. O diamante policristalino (PCD) é um composto de partículas de diamante sinterizado com um ligante metálico. O diamante é o mais duro e, portanto, o mais resistente à abrasão de todos os materiais. O PCD é bastante utilizado em ferramentas de corte, pois apresenta boa resistência ao desgaste, porém falta-lhe estabilidade química a altas temperaturas.

A grafite, que é o material que se pretende maquinar, é formada por átomos de carbono com hibridização  $sp^2$ , que formam lâminas de geometria hexagonal. A estrutura cristalina é formada pela acumulação dessas lâminas, que se ligam umas às outras por forças de Van der Waals. Termodinamicamente, a grafite é mais estável que o diamante em condições normais de pressão e temperatura. Embora a diferença entre as energias livres das duas fases seja pequena, a barreira energética para a transição de uma para a outra é elevada (2,9 kJ/mol).

A empresa Araújo & Silva Lda, pretende com a realização deste trabalho obter uma perspectiva de evolução, crescimento e procura de novos. Esta empresa especializada em produção e manutenção de ferramentas de corte para a indústria da madeira e seus derivados, procura a expansão do seu ramo de negócio. Como tal, tem vindo a explorar as potencialidades do diamante policristalino em indústrias como a dos moldes, mais propriamente como, material para ferramenta de corte para maquinar grafite.

Com o presente trabalho pretendeu-se analisar o comportamento do diamante policristalino quando utilizado em operações de maquinação da grafite, sendo o objetivo final a otimização dos parâmetros da ferramenta de corte.

## 2. Estado da Arte

---

### 2.1. Grafite

---

A grafite, tal como o diamante e os fulerenos, é um alótropo do carbono, no entanto dos três é o mais estável em condições normais de temperatura e pressão, sendo encontrada naturalmente e em elevadas quantidades. A grafite apresenta uma estrutura bastante estável (oxida-se a temperaturas superiores a 550°C) e condutividade elétrica elevada ( $10^4(\Omega.m)^{-1}$  à temperatura ambiente). Esta apresenta várias aplicações, incluindo a sua utilização (com estrutura modificada) em baterias secundárias de íons de lítio. Para além destas aplicações, existem outras como: a sua utilização na forma de instrumentos refratários, como lubrificantes, em retardadores de chama e outras peças de utilização industrial e até mesmo na vida quotidiana, como se pode ver pelo nome derivado da palavra grega “grapho”, que significa escrever. [1]

A grafite tem uma estrutura do tipo lamelar, que é formada por planos de átomos de carbono organizados de forma hexagonal (camadas de grafeno) em hidridização do tipo  $sp^2$ . Estas camadas estão ligadas entre si, principalmente, por forças de interação fraca do tipo Van der Waals, permitindo deste modo a intercalação de grandes quantidades de espécies químicas (moléculas e iões) no espaço entre os planos, uma vez que a distribuição eletrónica dos planos é facilmente alterada. São possíveis duas estruturas para a grafite, dependendo da distribuição dos planos de átomos de carbono: estrutura hexagonal ou romboédrica, conforme Figura 1. As grafites naturais têm quase sempre estrutura hexagonal adquirindo uma estrutura romboédrica durante o processo de pulverização do mineral. [1]

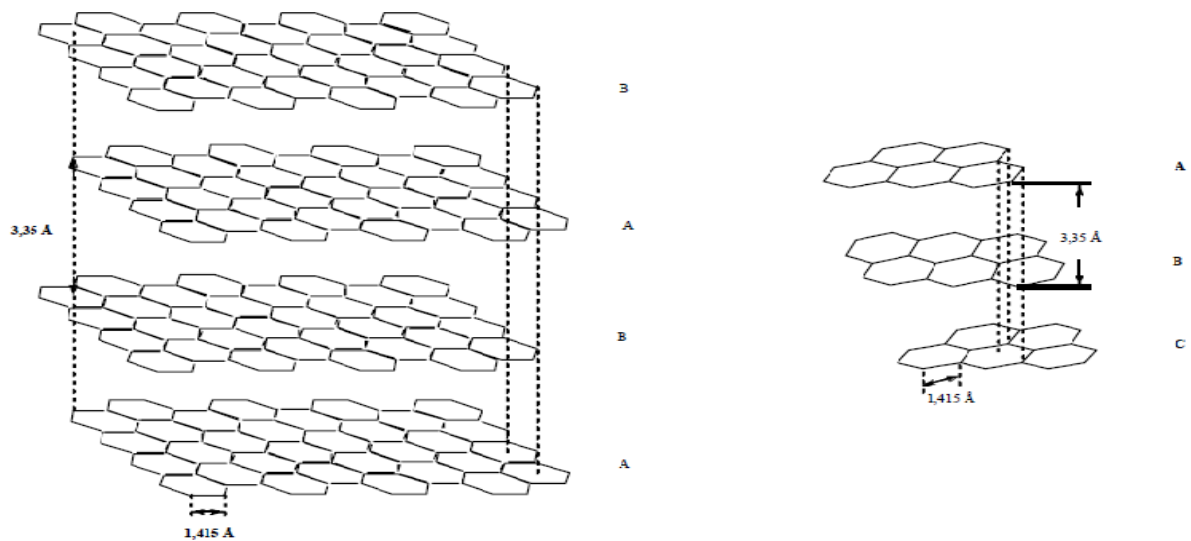


Figura 1 Estrutura da grafite fornecendo a distância entre os planos (eixo c) e a distância entre os átomos de carbono vizinhos: esquerda, grafite hexagonal; direita, grafite romboédrica. [1]

A grafite tem propriedades únicas, por causa da sua distinta estrutura em camadas e à sua inércia química e é utilizada em diversas aplicações, devido às suas características fundamentais: [2]

- Excelente condutividade elétrica e térmica;
- Excelentes propriedades lubrificantes, particularmente a elevadas temperaturas e pressão;
- Alta resistência à oxidação e durabilidade contra agentes químicos;
- Não prejudica o ambiente e não apresenta riscos para a saúde;
- Não apresenta riscos de explosão;
- Apresenta capacidade de as moléculas químicas serem intercaladas entre as camadas da grafite (entre os grafenos).

### 2.1.1. Obtenção da Grafite

Existem dois tipos de grafite, a grafite natural e a grafite sintética. A grafite natural, normalmente, contém impurezas que devem ser libertadas. Os carvões amorfos apresentam-se regularmente sob uma forma dividida e porosa, sendo que para ser utilizada para fins elétricos tem de existir um trabalho de aglomeração. [3]

A grafite sintética é um material inerte e que não contém componentes voláteis. Pode ser produzida industrialmente através de diversas matérias-primas, como o coque de

petróleo ou a antracite, em elevadas condições de temperatura e pressão. A pasta obtida é homogeneizada e misturada ou passada por fieiras e bastante compactada. O material é então cozido lentamente, sob a proteção de pó de coque, até atingir uma temperatura de pelo menos 1.000°C, para completa eliminação das partículas voláteis do ligante, e para transformação em coque das restantes. [3]

Os grãos de carbono encontram-se ligados por coque, e por força de retração, obtendo-se um carvão homogêneo, compacto e bom condutor de eletricidade. Este carvão é grafitizado por consequente tratamento térmico a altas temperaturas. Todas as etapas de fabricação e obtenção de grafite industrial estão apresentadas na Figura 2. [3]

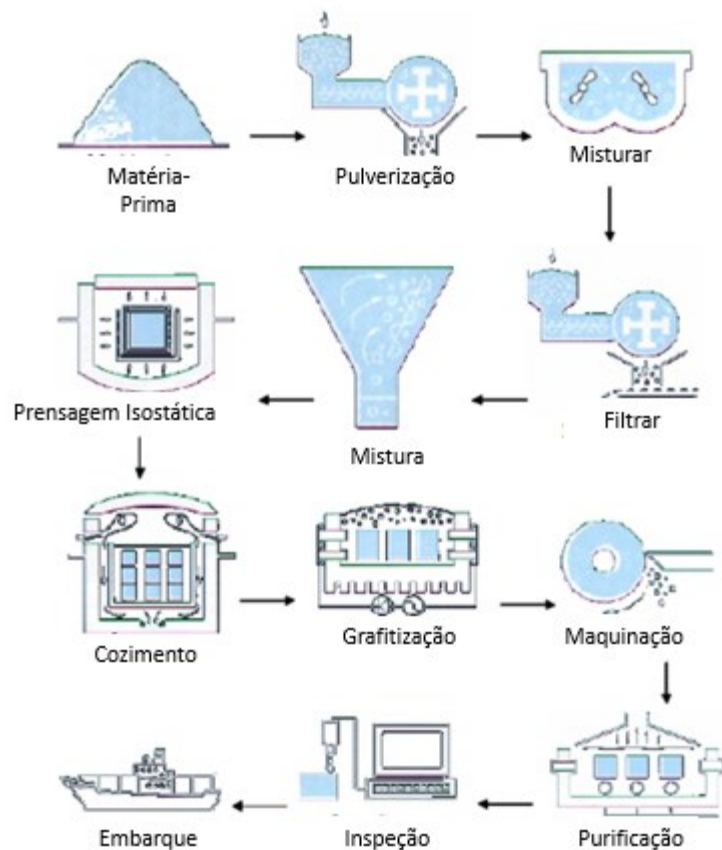


Figura 2 Etapas de fabricação da grafite industrial [3]

De forma a melhorar o desempenho do produto e de acordo com condições específicas, muitos fabricantes oferecem atualmente alguns tratamentos posteriores à produção de grafite. Estes tratamentos têm por base a impregnação com resinas, inibidores de corrosão, e também revestimentos para impermeabilização da superfície e prevenção de desgastes. [1]

A densificação também é um dos tratamentos muito utilizados, e consiste no preenchimento dos poros existentes no material com carbono puro, reduzindo assim o tamanho médio do grão e a porosidade, aumentando desta forma a densidade. [1]

## 2.1.2. Tipos e Características da Grafite

---

O processo de eletroerosão (EDM) com elétrodos de grafite tem muitas variáveis envolvidas. Existem diversas classes de grafite de diferentes fornecedores, até mesmo dentro do mesmo grupo, não sendo absolutamente idênticas e podendo não ter o mesmo desempenho. [4]

As grafites para EDM são normalmente classificadas pelo tamanho do grão. Este é utilizado como critério porque a maioria das outras propriedades e características da grafite estão relacionadas direta ou indiretamente com o tamanho do grão e a sua orientação. [3]

Atualmente, existe no mercado, classes de grafite com tamanho médio de grão de 20  $\mu\text{m}$  até granulometrias inferiores a 1  $\mu\text{m}$ . A escolha do tamanho médio do grão da grafite é determinada de acordo com o regime de trabalho ao qual o elétrodo está sujeito no processo de eletroerosão, ou seja, desbaste, semi – acabamento ou acabamento, bem como a sua geometria. [3]

As grafites para EDM são classificadas em cinco grupos: [3]

- Nanofinas (submicrométricas): tem um tamanho típico do grão  $< 1 \mu\text{m}$ .
- Ultrafinas: tem um tamanho típico do grão entre 1-5  $\mu\text{m}$ .
- Superfinas: tem um tamanho típico do grão entre 6-10  $\mu\text{m}$ .
- Finas: tem um tamanho típico do grão entre 11-20  $\mu\text{m}$ .
- Médias: grafitas com grãos do tamanho entre 21 e 100  $\mu\text{m}$ .

Geralmente, as classes de grafite com tamanho médio da partícula inferior a 1  $\mu\text{m}$  são utilizadas para trabalhos de acabamento fino no processo de EDM, uma vez que a rugosidade da peça produzida está diretamente relacionada com o tamanho da partícula do material do elétrodo. [3]

O preço desta classe de material é elevado, o que faz com que os elétrodos feitos em grafite sejam mais caros. Classes de grafite com tamanho médio de grão entre 10 e 20  $\mu\text{m}$  são utilizadas, normalmente, em processos de desbaste. Os preços de mercado são mais acessíveis para estas classes de grafite. [3]

A grafite apresenta as seguintes características: [5]

- Maquinação rápida e fácil, sem imperfeições. Excelente maquinabilidade combinada com alta resistência e com bom resultado na estabilidade dimensional na taxa de alta velocidade de corte e economia de tempo na produção de eletrodo. Em contraste com os eletrodos de cobre, os eletrodos de grafite não necessitam de operações adicionais para remover pequenas imperfeições.
- Taxa de remoção mais elevada e elevada resistência ao desgaste em comparação com o cobre. Alta resistência à erosão e resultados mínimos de desgaste dos eletrodos quer em economia de custo e de tempo.
- O peso leve, com densidade quatro vezes menor do que o cobre. Este peso leve da grafite torna mais fácil de gerir e lidar com grandes eletrodos e otimizar os custos dos mesmos.
- Alta estabilidade térmica e alta resistência ao choque térmico. Dimensões do eletrodo permanecem estáveis durante o processo de erosão e são mantidas elevadas densidades de corrente. Este resulta em resultados bastante precisos de maquinação, de modo a alcançar geometrias bem definidas.
- Tem um baixo coeficiente de expansão térmica (3 vezes menor do que o cobre) o que garante a estabilidade da geometria do eletrodo durante a maquinação.
- Está disponível em grandes blocos.
- Tem a característica singular de que a relação de desgaste tende a diminuir com o aumento da corrente de pico.

A grafite remove melhor o material do que o cobre ou cobre – tungstênio. A taxa de desgaste tende a diminuir à medida que as descargas aumentam, ao contrário do cobre, cujo desgaste aumenta em correntes mais elevadas. Portanto, a grafite é adequada para a maquinação de grandes eletrodos se trabalhando com uma intensidade de corrente alta proporciona a diminuição do tempo de desbaste. [6]

Embora a grafite seja apta a descargas, esta pode ser eliminada através de uma lavagem de qualidade, reduzindo a intensidade da descarga durante a maquinação de polaridade negativa. No entanto, como resultado, a maquinação de carbonetos de tungstênio é mais difícil do que com eletrodos de cobre- tungstênio. Além disso, a grafite é uma cerâmica,

que é sensível a choques mecânicos, e, conseqüentemente, devem ser manuseadas e maquinadas com cuidado. [6]

### 2.1.3. Maquinação por Eletroerosão

---

Hoje em dia a grafite, devido às excelentes propriedades que apresenta, é um material bastante utilizado em processos de maquinação por eletroerosão.

O processo de maquinação por eletroerosão, também conhecido como EDM (*Electrical Discharge Machining*) é um processo de maquinação não convencional muito utilizado na indústria mecânica de precisão, sendo que já não se trata de apenas mais um método de maquinação "não convencional". Este processo torna-se útil na medida em que corresponde aos requisitos que outros processos convencionais de maquinação não conseguem corresponder como, o fabrico de geometrias complexas, cavidades com acesso restrito e maquinação de materiais endurecidos. [4]

Para a seleção do material dos elétrodos utilizados em eletroerosão, existem variáveis importantes a serem consideradas: a taxa de remoção de material, a taxa de desgaste do elétrodo, a rugosidade da superfície erodida, a maquinabilidade do elétrodo, o custo do material do elétrodo, além do tempo associado ao processo. No entanto, as propriedades termofísicas da peça e do elétrodo (tais como a condutividade térmica e elétrica, expansão térmica, temperatura de fusão e temperatura de ebulição) têm uma influência importante sobre o desempenho no processo EDM, principalmente no que diz respeito à taxa de remoção de material, desgaste do elétrodo e integridade da superfície da peça. [4]

Devido ao desgaste resultante no elétrodo, são normalmente utilizados muitos elétrodos de acordo com a maquinação, sendo que o desgaste afeta diretamente a precisão, o que leva a substituições frequentes, aumentando cerca de 50% do custo das ferramentas. [4]

#### 2.1.3.1. Elétrodo

A seleção adequada do material do elétrodo é uma decisão essencial no plano do processo para qualquer trabalho com EDM. O material do elétrodo deve apresentar algumas propriedades básicas como a condutividade elétrica e térmica, uma temperatura de fusão elevada, baixa velocidade de desgaste, e resistência à deformação durante a maquinação. Uma vez que a EDM é um processo térmico, seria lógico assumir que

quanto maior for o ponto de fusão do eletrodo, melhor será a relação de desgaste entre o eletrodo e a peça. [4]

Na verdade, existe uma enorme diversidade de materiais utilizados para a fabricação de eletrodos, como o latão, carboneto de tungstênio, cobre eletrolítico, liga de cobre tungstênio, liga de prata tungstênio, liga de cobre telúrio, outras ligas de cobre, grafite, entre outros. Eletrodos metálicos geralmente funcionam melhor para materiais de baixo ponto de fusão como o alumínio, cobre e latão. No entanto, para o aço e as suas ligas, a grafite é a preferida. Regra geral, eletrodos metálicos devem ser aplicados para ligas de baixa temperatura de fusão e eletrodos de grafite devem ser aplicados para ligas de alta temperatura de fusão. [4]

#### 2.1.3.2. Eletrodo de Grafite

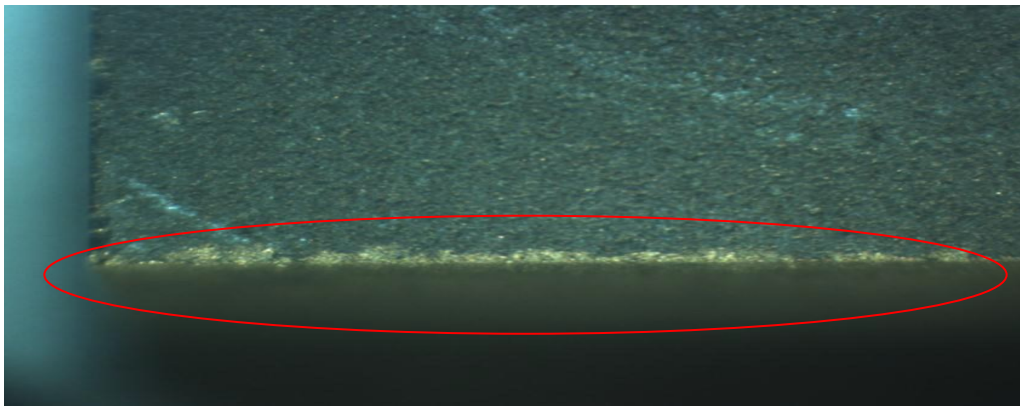
A grafite sintética é um material inerte, que não contém componentes voláteis. As matérias-primas mais utilizadas para a obtenção de grafite sintética são: vários tipos de coque negro de fumo e grafites naturais que começam por serem moídas, peneiradas e adicionadas a um ligante. O processo de obtenção da grafite tem muitas variáveis envolvidas. Como resultado, as classes de grafite de diferentes fornecedores não são absolutamente idênticas e podem não ter o mesmo desempenho. [4]

A grafite tem características de boa condutividade elétrica e térmica e é resistente a temperaturas até 3000°C. As principais aplicações de grafite são encontradas especialmente em aplicações com altas temperaturas de trabalho, tais como no fabrico de eletrodos. Estudos mostram que os eletrodos de grafite apresentam uma maior taxa de remoção de material em relação ao seu desgaste. A grafite não funde na ignição do arco elétrico, ao invés, a cerca de 3350°C transforma-se em gás. Para a maioria dos casos, a grafite é o material de eletrodo mais eficiente, devido à resistência relativamente elevada que apresenta ao calor (quando comparada ao cobre). [4]

Existem aspetos negativos associados ao uso da grafite, como por exemplo, a formação de um pó fino resultante desta maquinação. A formação deste pó fino causa problemas de qualidade da superfície maquinada e problemas de desgaste da ferramenta de corte além de ser bastante prejudicial para as partes eletrónicas da máquina. Todas estas dificuldades tornam-se ainda maiores, uma vez que praticamente não existem profissionais e técnicos especializados em maquinação de grafite e a informação disponibilizada sobre este processo é reduzida. Além disso, existem poucas máquinas dedicadas à maquinação de grafite. A maquinação de grafite em máquinas convencionais ou automáticas necessita de adaptações para o trabalho com este tipo de material, e

estas muitas vezes não são realizadas de maneira correta, causando falhas e deterioração das máquinas em pouco tempo de utilização, sendo capaz de dissolver sobre as guias da máquina e quando misturado com o fluido de corte age como um composto de polimento, que eventualmente, reduz a precisão da máquina. [4]

A grafite apresenta outra característica negativa, que é o facto de ser um material frágil, o que leva a outro inconveniente: a composição do material conduz a um comportamento mecânico frágil. Durante e após a penetração da ferramenta de corte no interior do material, há introdução de tensões de compressão que podem levar à rutura do material. Este facto ajuda na separação das partículas da grafite e na formação de superfícies de fratura nas arestas e cantos vivos. Na Figura 3 é evidente este comportamento de fratura das arestas em cantos vivos. [4]



*Figura 3 Fratura das arestas decorrente da maquinação [4]*

Outro fator importante para a escolha da grafite como eléctrodo é o tamanho do grão. A granulometria influencia diretamente o custo, sendo que à medida que os grãos são mais finos, maior o custo do material. Atualmente, existem várias classes de grafite para comercialização, ou seja, material com diferentes tamanhos de partícula, desde inferiores a  $1\mu\text{m}$ , fabricados em grande parte sob encomenda, até tamanhos com  $20\mu\text{m}$ . [4]

## **2.2. Corte por Arranque da Apara**

---

Um componente mecânico de determinada geometria pode ser obtido por meio de um processo tecnológico de alteração da forma através da remoção de material não necessário. Este processo denomina-se por corte por arranque da apara. [7]

As diversas operações que utilizam o corte por arranque da apara para obter diversas geometrias apresentam diferentes parâmetros, pois embora o processo de corte seja

igual, existe a necessidade de estudar em pormenor o mecanismo de formação da apara. [7]

Através da realização de ensaios é possível estudar os mecanismos fundamentais de formação da apara, estabelecer a relação entre os parâmetros de corte, recolher elementos de previsão das forças aplicadas, estado de tensão na interface, potências necessárias, comportamento das ferramentas/máquinas e as temperaturas atingidas. [8]

A relação entre o desgaste e as condições de corte devem ter em conta a pressão e temperatura na zona de contato, características mecânicas do material a maquinar, deformação e propriedades mecânicas, físicas, químicas e metalúrgicas dos materiais das ferramentas. [8]

Para uma melhor compreensão do processo de formação da apara é necessário ter conhecimento sobre comportamento dos materiais, temperatura gerada, forças que afetam a potência necessária ao corte e estudo da aresta de corte em determinadas condições de maquinação. [7]

### **2.2.1. Formação da Apara**

---

Os mecanismos da formação da apara dependem da análise do processo segundo diversos fatores, como a mecânica dos meios contínuos, a transferência de calor e aspetos metalúrgicos do material a maquinar e das ferramentas. [9]

A natureza do mecanismo de formação da apara é muito variável e só pode ser explicada pela combinação de vários fatores referidos anteriormente, pela geometria da ferramenta e pela espessura média da apara. [9]

Numa primeira fase, a aresta de corte da ferramenta penetra na peça, comprimindo uma porção de material contra a face de ataque. Ao continuar a ser empurrada, as tensões de corte atingem valores críticos iniciando-se o escorregamento entre a porção do material a ser empurrado e a peça. A apara sofre uma deformação plástica o que resulta num aumento da sua espessura. [9]

As forças geradas no processo de corte aumentam progressivamente até que as tensões de corte desenvolvam o escorregamento sem que ocorra perda de coesão entre a porção de material removido e a peça. [10]

A direção para a qual as tensões são máximas corresponde ao plano de corte. Numa segunda fase, a fissura na região do plano de corte pode ser parcial ou total, dando origem a uma avara que pode ser contínua ou descontínua. [10]

Na sequência do movimento relativo entre a peça e a ferramenta existe um escorregamento da avara sobre a face de ataque da ferramenta e no mesmo momento é comprimida uma nova quantidade de material concluindo o ciclo. [10]

Na Figura 4, podemos observar o plano que separa o material deformado do não deformado ao qual se dá o nome de plano de corte ( $P_{sh}$ ). O ângulo deste plano com a peça chama-se ângulo de corte ( $\theta$ ). O material que se encontra à direita do plano de corte é a avara deformada com uma espessura ( $h_{ch}$ ) e o material que se encontra à esquerda é a avara não deformada ( $h_D$ ). [7]

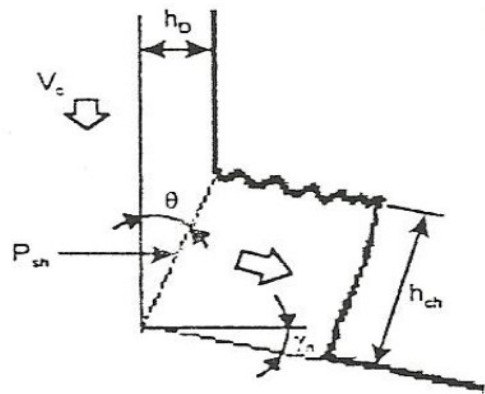


Figura 4 Formação da avara [7]

A deformação da avara está relacionada com a espessura da avara não deformada, com o ângulo de ataque ( $\gamma_n$ ) e com as propriedades mecânicas. O mecanismo de formação da avara é um fenómeno cíclico alternado pela fase de encalque e pela fase de corte onde a força máxima é obtida na fase de encalque. [7]

A Figura 5 mostra em a) o plano de corte e em b) as regiões de deformação primária (I) e secundária (II). [7]

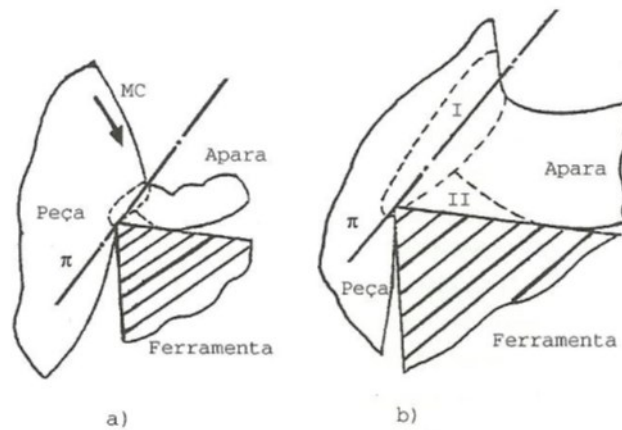


Figura 5 Regiões de deformação da aparagem [7]

A região primária apresenta uma grande deformação plástica enquanto que a região secundária resulta de deformações provocadas pelo atrito entre a aparagem e a face de ataque da ferramenta. [7]

O comportamento plástico do material no plano de corte tem grande influência no processo, sendo que o estado de tensão provoca endurecimento na aparagem e na superfície de corte. Este provoca um aumento das forças de corte, reduz o ângulo de corte e provoca maior atrito sobre a face de ataque da ferramenta. [8]

A deformação da aparagem depende do ângulo de ataque da ferramenta. Quando o ângulo de corte é pequeno as forças de corte necessárias ao corte são elevadas, ou seja, os fatores como o ângulo de ataque e os parâmetros de corte influenciam as condições de trabalho. O atrito produz-se à medida que material é sujeito a grandes pressões e temperaturas, durante todo o processo. [8]

Em algumas ocasiões, o material deformado pode soldar na face de ataque da ferramenta e impedir o deslocamento na superfície de separação o que causa grande dificuldade no processo de corte. No entanto, o deslizamento contínuo entre a peça e a ferramenta vai gerar mais calor nesta zona estacionária. [8]

## 2.2.2. Tipos de Aparagem

A formação da aparagem é influenciada pelo material a maquinar, desde aparagens curtas nos materiais frágeis (endurecidos) até à aparagem longa nos materiais dúcteis. [10]

Existem diversos fatores que influenciam a formação da apara, tais como: as forças de corte, as temperaturas e as vibrações. Por sua vez, a rutura não se consegue apenas com a combinação de geometria da ferramenta e velocidade de corte. [10]

Principalmente, nas operações de furação e torneamento, o controlo da apara é um dos fatores chave. A fresagem cria um comprimento natural na apara devido ao fio de corte. Na furação o controlo da apara é importante devido ao limitado espaço dentro dos furos que estão a ser maquinados. Este problema pode ser ultrapassado por um processo de furação de alto rendimento onde a apara constituiu uma forma exata para o aumento da eficiência de evacuação e evita a aglomeração. São exemplos de melhoria: alteração da geometria da hélice, lubrificação interna, revestimento de brocas, etc. [10]

Para a formação da apara, existem vários fatores que devem ser tidos em consideração: [7]

- Material da peça – ductilidade, estrutura, dureza e dimensão;
- Geometria da ferramenta – ângulo de posição e de ataque afetam o comprimento e direção da apara, o raio de ponta afeta a apara em função da profundidade. A geometria da face ataque é importante no controlo da apara e da sua regulação.
- Parâmetros de corte – Avanço, profundidade, velocidade de corte e refrigeração;

As aparas são, normalmente, classificadas em três tipos: [7]

- Contínua regular – Materiais dúcteis e avanços pequenos;
- Contínua irregular com aderência – Materiais dúcteis maquinados a baixa velocidade e sem refrigeração;
- Descontínua – Materiais frágeis ou condições de corte em que a zona de deformação primária se alargue para ângulos de corte reduzidos que facilitam a propagação de uma fissura ao longo do plano de corte (ferros fundidos).

Quanto à sua forma as aparas podem ser classificadas do seguinte modo, como podemos observar nas Figuras 6 e 7: [7]

- Em fitas ou lisas, de difícil evacuação;
- Em espiral, típica de operações de sangramento;
- Em helicoidal, de fácil evacuação;
- Em forma de “vírgula”, de fácil evacuação;
- Em pequenos fragmentos, de fácil evacuação da zona de trabalho.

Em fita	Tubular	Espiral	Helicoid. em gume	Helicoid. cônica	Em arco	Em lasca	Em agulha
Longa	Longa	Plana	Longa	Longa	Ligada		
Curta	Curta	Cônica	Curta	Curta	Fragmento		
Enrolada	Enrolada		Enrolada	Enrolada			

Figura 6 Representação das formas da apara, norma ISO 3685 [7]

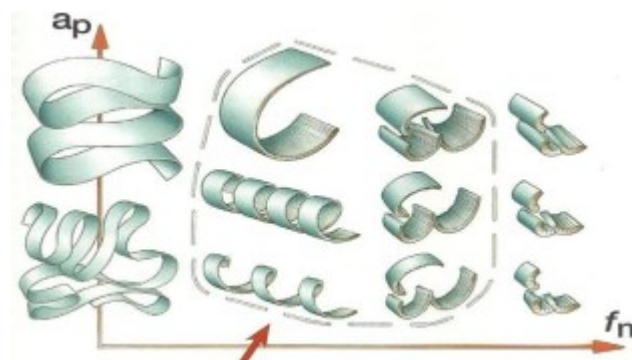


Figura 7 Ilustração dos tipos de apara em função da profundidade de corte ( $a_p$ ) e a velocidade de avanço ( $f_n$ ) [7]

### 2.2.3. Parâmetros de Corte

Os parâmetros de corte mais comuns são: velocidade de rotação, velocidade de corte, velocidade de avanço, avanço por revolução, avanço por dente, profundidade de corte axial, profundidade de corte radial e volume de material removido.

- **Velocidade de rotação – N (rpm)** – É o número de rotações por minuto efetuado pelo eixo da ferramenta. É um parâmetro de regulação da máquina, que contudo pouco nos diz sobre o que se passa na periferia da ferramenta, se não considerarmos para um determinado diâmetro da ferramenta o seu efeito na velocidade de corte. É dado por: [11]

$$N = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D} (\text{min}^{-1}) \quad (1)$$

em que:

**Vc:** é a velocidade de corte (m/min);

**D:** é o diâmetro da ferramenta (mm).

- **Velocidade de corte – Vc (m/min)** - Velocidade linear instantânea do ponto de referência da aresta de corte. É o parâmetro de corte mais importante e a sua variação provoca alterações importantes nas características do corte e na duração de vida das ferramentas. A velocidade de corte é um parâmetro tecnológico de corte e o número de rotações é um parâmetro de regulação da máquina. A diferença é que o primeiro é selecionado em função de uma operação concreta e o segundo é obtido por cálculo com base no valor selecionado para o primeiro. [11]

$$V_c = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \text{ (m/min)} \quad (2)$$

- **Velocidade de avanço – Vf (mm/min)** - Velocidade linear instantânea do movimento relativo de avanço da ferramenta. Representa-se por um vetor cujo sentido é o do movimento linear da ferramenta em relação ao material a cortar. É um parâmetro de regulação da máquina, dado por: [11]

$$V_f = f_z \times N \times z \text{ (mm/min)} \quad (3)$$

em que:

**fz:** é o avanço por dente ou aresta de corte (mm);

**N :** é o n.º de rotações por minuto (rpm);

**z :** é o n.º de dentes ou arestas de corte da ferramenta.

- **Avanço por revolução - f (mm/rot.)** - É um parâmetro tecnológico e simultaneamente de regulação da máquina. Serve para cálculo da velocidade de avanço e determinação da capacidade de acabamento. [11]

$$f = V_f / N \text{ (mm/rot)} \quad (4)$$

- **Avanço por dente - fz (mm)** - É o percurso de avanço de cada aresta de corte medido na direção da velocidade de avanço e corresponde à geração de duas superfícies de corte consecutivas. É um valor chave na fresagem que indica os limites da ferramenta. [11]

- **Profundidade de corte axial -  $a_p$  (mm)** - É a distância a que a ferramenta é colocada abaixo da superfície a maquinar, medida na direção paralela ao eixo da ferramenta, ou a espessura da aparta não deformada. [11]
- **Profundidade de corte radial -  $a_e$  (mm)** - É a distância que a ferramenta cobre da superfície da peça a maquinar, medida perpendicularmente ao eixo de rotação da ferramenta. [11]
- **Volume de material removido -  $V$  (mm<sup>3</sup>/min)** - Volume de material removido por unidade de tempo, dado por: [11]

$$V = a_e \times a_p \times V_f(\text{mm}^3/\text{min}) \quad (5)$$

## 2.3. Ferramentas

---

As fresas podem ser classificadas principalmente em de Corpo Sólido (Figura 8) e Porta-Pastilhas. Nas de corpo sólido, as regiões da ferramenta que realizam o corte e a haste de fixação da ferramenta representam um único corpo. O PCD é aplicado maioritariamente nas ferramentas para fresagem [7]



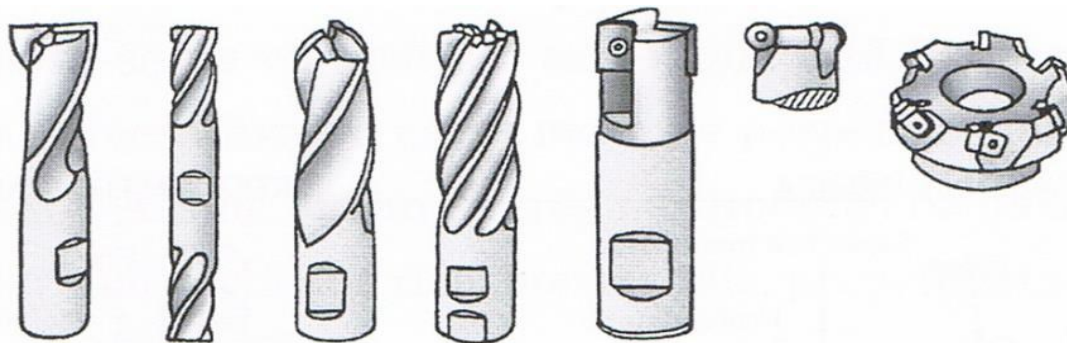
*Figura 8 Fresas de corpo sólido com diferentes características geométricas [7]*

Relativamente às matérias-primas mais utilizadas no fabrico de ferramentas, as fresas podem ser de aço rápido ou metal duro, sendo este último permite uma fresagem com elevadas velocidades de corte e mantendo uma razoável vida útil comparado com o material anterior. Além da matéria-prima, as ferramentas podem possuir um revestimento

superficial para auxiliar a “troca” térmica no momento do corte, assim como propiciar um agente antiabrasivo, prolongando a vida útil da ferramenta e permitindo velocidades de trabalho superiores. [7]

No caso das fresas Porta-Pastilhas (Figura 9), as respetivas pastilhas são fabricadas por sinterização e recebem um tratamento superficial. As pastilhas são fixadas às ferramentas por um parafuso de fixação e as suas faces podem ser rodadas quando apresentarem desgaste. [7]

Este tipo de ferramentas embora sejam mais económicas, pois no final do tempo de vida útil apenas são alteradas as pastilhas, as ferramentas de corpo sólido ainda possuem um amplo espaço de trabalho porque permitem operações de maquinação com maior precisão, o que resulta num melhor resultado na qualidade final. Uma gama de diferentes ferramentas de corte para fresagem pode ser vista na Figura 9: [10]



*Figura 9 Exemplos de alguns tipos de fresas de corpo sólido e porta-pastilhas [10]*

Entre as ferramentas de corte rotativas mais usuais encontram-se as Fresas Porta Pastilhas de Facejar, vulgarmente conhecidas por rocas (Face Mill Tools). Estas destinam-se a operações de facejamento da peça em causa, tal como é possível visualizar na Figura 10. [10]



*Figura 10 Rocas realizando o facejamento [10]*

Não menos utilizadas são as denominadas de Fresas de Topo Raso (End Mill Tools), (Figura 11). Estas são aplicadas na maquinação de rasgos, contornos, rebaixos, rasgos de diferentes tipos e tamanhos e fresagem de contornos. [10]



*Figura 11 Fresas de Topo Raso [10]*

Por vezes também utilizadas, especialmente em Centros de Maquinação CNC, são as Fresas de Topo esférico (Ball Nose Mill Tools) que podemos visualizar nas Figuras 12 e 13. Estas podem ter 2, 3 ou 4 arestas de corte helicoidais e destinam-se a fresagem de canais cilíndricos, tronco - cónicos e superfícies complexas a 3 ou mais eixos. [10]



*Figura 12 Fresas de Topo Esférico [10]*



*Figura 13 Fresagem com Fresa de Topo Esférico [10]*

## 2.3.1. Materiais das Ferramentas de Corte

---

Os materiais para ferramentas de corte tiveram um grande desenvolvimento durante o séc. XX, em particular, nos anos 30. Hoje em dia, uma operação de maquinação é exequível em cerca de 1% do tempo que era necessário no início do séc. XX. O desenvolvimento da indústria mundial através das duas grandes guerras está associada a esta evolução. Nesta primeira década do séc. XXI, a evolução continua com os fabricantes de ferramentas de corte a explorar, pesquisar e investigar novas soluções no processo de corte: ferramentas anti vibração, com lubrificação interna, geometria da ferramenta, novos revestimentos, ferramentas especiais (por tipo de operação, aplicação, indústria, máquina, etc.) [7]

Atualmente existem soluções para os materiais de ferramentas, por forma a otimizar cada operação de maquinação. Existem outros fatores de interesse na seleção da ferramenta apropriada: [7]

- Tipo de operação;
- Material a maquinar;
- Geometria da peça (processo e/ou tratamento térmico anterior);
- Máquina Ferramenta;
- Estado da superfície exigido;
- Estabilidade no corte.

Cada um destes fatores condiciona a seleção da ferramenta adequada e consequentemente os parâmetros de corte em trabalho. Basicamente, nas características do corte são necessários saber qual o tipo de operação, desbaste ou acabamento e as operações de corte: fresagem, torneamento, furação, etc. [7]

### 2.3.1.1. Propriedades Fundamentais dos Materiais

Existem materiais para ferramentas de corte com capacidade superior nas operações de acabamento do que outros. A eficiência de uma operação de maquinação obriga à seleção cuidada dos materiais adequados na execução de ferramentas de corte, esta escolha exige a análise ponderada de fatores técnicos e económicos. [7]

O material caracteriza-se pela sua dureza, estrutura, composição química e integridade da superfície cortante (resistência ao desgaste e calor). [7]

As propriedades fundamentais a exigir aos materiais para o fabrico de ferramentas de corte são as seguintes: [7]

- Dureza a quente e a frio (resistência ao desgaste e calor/deformação);
- Elevada tenacidade (resistência à rotura);
- Resistência ao choque térmico (gradiente térmico);
- Conservação da aresta cortante (grão fino);
- Baixo coeficiente de atrito (diminui a tendência de soldar);
- Elevada condutibilidade térmica (dissipação do calor gerado);
- Baixo coeficiente de dilatação térmico;
- Elevado calor específico (variações de temperatura pequenas e lentas);
- Química inerte (afinidade química entre a ferramenta e o material a maquinar).

Algumas destas características são contraditórias e não podem ser conseguidas por um mesmo material. Tal ferramenta que concilie todas estas propriedades seria a ferramenta ideal. [7]

#### 2.3.1.2. Materiais das Ferramentas de Corte

Os materiais que correspondem às solicitações de corte mais utilizados para ferramentas de corte, são os seguintes: [7]

- HSS – Aço rápido;
- C – Carbonetos sinterizados;
- CG – Carbonetos sinterizados revestidos;
- CT – Cermet;
- CC – Cerâmica (à base de óxido de Al – pura, mista e reforçada / à base de nitreto de Si);
- CBN – Nitreto de Boro Cúbico;
- PCD – Diamante policristalino.

Os tempos não produtivos resultantes do desgaste e rotura de ferramentas na maquinação condicionam a produtividade. A seleção do material da ferramenta e a sua qualidade são críticas. Uma única qualidade não satisfaz diversas aplicações de maquinação. [7]

Os carbonetos sinterizados são os materiais para ferramentas mais utilizados à escala mundial ultrapassando os consumos de aço rápido – HSS (Tabela 1). [7]

*Tabela 1 Propriedades dos materiais para ferramentas [7]*

Material	Dureza (HV 10/30)	Tensão Rotura Transversal (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente Dilatação Térmica ( $\times 10^{-6}$ )	Condutibilidade Térmica W/m.K
Aço rápido	700–900	2500–4000	2,6	9–12	15–48
Carbonetos	1200–1800	1300–3200	4,7–6,5	4,6–7,5	20–80
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1350–1600	600–900	2,8–3,2	3–3,3	20–35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1540–2100	400–800	3–4,5	5,5–8	10–38
CBN	3500–4000	500–800	6,8	4,9	100
PCD	5000–6000	600–1100	8,4	1,5	550

A percentagem de utilização de outros materiais é reduzida, no entanto, materiais duros como os cerâmicos permitem em determinadas aplicações velocidades de corte elevadas. A maior rigidez das máquinas, melhoria dos sistemas de aperto e maior equilíbrio dinâmico das ferramentas permite o aumento da utilização de materiais duros e consequentemente mais frágeis. [7]

## 2.3.2. Diamante

O material usado nas ferramentas a maquinar foi o diamante pelo que é o único que será abordado com relevância neste trabalho. A primeira síntese de diamante foi realizada pela General Electric (GE) em 1954, tendo a sua produção industrial começado em 1957. A primeira ferramenta a utilizar o diamante policristalino (PCD) sintético foi apresentada em 1973. [12]

### 2.3.2.1. Composição Química, Tipo de Ligações e Estrutura

A estrutura cristalina do diamante, representada esquematicamente na Figura 14, pode ser obtida em laboratório, colocando ligas de carbono, como a grafite, em condições de altas pressões e temperaturas. Embora o diamante possa ser obtido de forma artificial sob essas condições, o chamado diamante sintético, este também pode ser encontrado na natureza, chamado de diamante natural, mas que se formou por processos termodinâmicos equivalentes (de altas pressões e altas temperaturas em laboratório) nas camadas profundas do manto terrestre. [13]

Na estrutura do diamante, cada átomo de carbono está ligado a quatro átomos vizinhos de carbono, sendo que os quatro elétrons disponíveis (em cada átomo) para fazer as ligações químicas arranjam-se espacialmente de tal forma a ficarem em configurações do

tipo de orbitais  $sp^3$ . Esses orbitais formam uma estrutura tetraédrica com ângulos de  $109,5^\circ$  entre si, considerando cada átomo de carbono na posição central dessas orbitais. A sua estrutura cristalina é cúbica da face centrada, com uma base de dois átomos. [13]

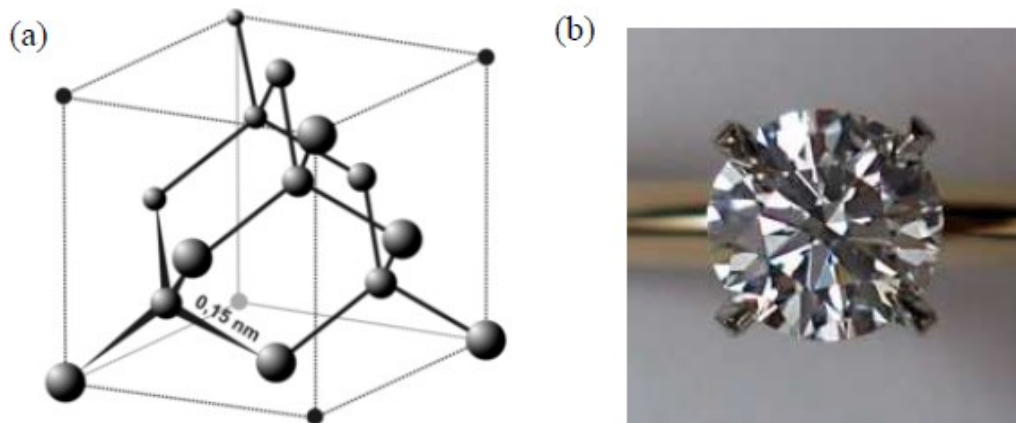


Figura 14 (a) Estrutura cúbica de face centrada dos átomos de carbono no diamante; (b) e configuração macroscópica de um cristal de diamante [13]

### 2.3.2.2. Composição Química, Tipo de Ligações e Estrutura

O diamante é o material com maior dureza e condutividade térmica disponível na natureza. Tem boa resistência ao desgaste devido à elevada dureza e ao baixo coeficiente de atrito. Contudo, é muito frágil devido à clivagem octaédrica. Possui também afinidade eletrônica negativa pelo que é fácil remover elétrons da sua superfície no vácuo. [14]

O diamante não reage com ácidos comuns mesmo em temperaturas elevadas. Apesar de ser menos estável do que a grafite, a sua transformação nesta fase mais estável à temperatura ambiente é improvável. A transformação é mais evidente a temperaturas superiores a  $1500^\circ\text{C}$ . A estabilidade térmica do diamante sintético ao ar é menor do que a do natural, oxida ou grafitiza a  $850^\circ\text{C}$ . [14]

### 2.3.2.3. Produção

O diamante natural é obtido por exploração mineira em jazidas vulcânicas, mas a sua pouca abundância implica que em média sejam necessárias 250 toneladas de minério para extrair 1 quilate. A produção de diamante artificial pode fazer-se por HPHT onde grafite é comprimida numa prensa hidráulica a  $1000\text{MPa}$  e aquecida a mais de  $2000^\circ\text{C}$  na

presença de um catalisador o que produz monocristais mais pequenos e menos puros que os naturais. [14]

Outro processo é por deposição química a partir da fase de vapor CVD. Esta técnica, fundamenta-se na transformação de moléculas gasosas contendo carbono em materiais sólidos na forma de filmes finos sobre um substrato. [14]

Os cristais produzidos por HPHT podem ser fixados em ferramentas abrasivas, já os produzidos por CVD destinam-se ao revestimento de superfícies de materiais. [14]

#### 2.3.2.4. Aplicações

Os diamantes não são somente utilizados como artigos de luxo em peças de joalheria. Os cristais produzidos por HPHT podem ser fixados em ferramentas abrasivas, os produzidos por CVD destinam-se ao revestimento de superfícies de materiais sujeitos a muito desgaste que requerem elevada dureza superficial. Assim podemos encontrar filmes de diamante como revestimento em máquinas de perfuração, engrenagens, cabeças de disco de gravação óticas e até mesmo em lentes e micrómetros de alta precisão. [13]

O diamante possui características excepcionais como dureza e resistência ao desgaste, mas porque é muito raro, o seu preço é elevado, o que dificulta o seu uso em aplicações industriais. Porém, o preço de diamantes de pequenas dimensões ou até mesmo pós resultantes de operações de polimento de diamantes maiores é bastante mais reduzido. Tentando aproveitar as propriedades destes pós de diamante surgem compósitos obtidos por sinterização como o de diamante-SiC onde o SiC é usado como elemento ligante e que estão a ser usados industrialmente. [13]

#### 2.3.2.5. PCD – Diamante Policristalino

O diamante policristalino é um material de corte produzido sinteticamente que consiste em cristais de diamante unidos de forma aleatória. As principais aplicações dos revestimentos de PCD incluem: alumínio e ligas de alumínio com mais de 4% de silício, metais não férricos e metais preciosos (prata e ouro), sintéticos, ligas de titânio, circuitos impressos, cerâmicas, fibra de vidro e sintéticos de fibra de carvão reforçados (GFK e CFK). [15]

As pastilhas PDC são também conhecidas, no comércio internacional, como “Polycrystalline Diamond Compact”. São dispositivos, que instalados no corpo das ferramentas de perfuração, constituem as chamadas ferramentas PDC. [16]

### 2.3.3. Vida das Ferramentas

---

A vida de uma ferramenta pode ser definida como sendo o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder a capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Por outras palavras, a ferramenta trabalhando em condições normais de corte é usada até que o seu desgaste, previamente estabelecido, seja tal que exija a sua substituição. Assim, a ferramenta deve ser substituída quando se observar: [17]

- Valores elevados de desgaste podendo levar à quebra da ferramenta;
- Temperaturas excessivas atingidas pela ferramenta;
- As tolerâncias dimensionais fogem do controlo;
- Acabamento superficial deixa de ser satisfatório;
- As componentes da força de maquinação aumentam excessivamente.

O fim de vida de uma ferramenta de corte pode ser definido pelo grau de desgaste estabelecido. O desgaste afeta: a precisão, a qualidade e o aumento da força de corte. A aresta da ferramenta desgasta-se com maior facilidade na face de saída e no flanco, sendo dependente da forma e da duração da solicitação térmica, mecânica e química da região. O motivo do desgaste está na combinação de altas temperaturas de maquinação e fortes carregamentos mecânicos. [17]

Existem diferentes variáveis que influenciam direta ou indiretamente o tempo de vida de uma ferramenta: [17]

- Peça: natureza do material; composição química; processo de fabricação; tratamento térmico; propriedades físicas, químicas, mecânicas; microestrutura; dimensões e forma.
- Ferramenta: tipo de material; geometria; composição; propriedades químicas, físicas e mecânicas; largura da marca de desgaste do flanco (critério de fim de vida).

- Máquina: tipo de máquina; rigidez; velocidade de corte (parâmetro mais significativo), avanço e profundidade de corte; área e forma de seção de corte; fluidos de corte (tipo, propriedades lubrificantes, forma de aplicação, etc.).

F. W. TAYLOR demonstrou em 1907, que a relação entre a vida da ferramenta e a velocidade de corte, pode ser descrita pela seguinte equação: [18]

$$V_c \cdot T^y = C_t \quad (6)$$

Em que: [18]

$V_c$  = velocidade de corte [m/min];

$T$  = Tempo de vida da ferramenta [min];

$C_t$  = Constante cujo valor depende principalmente do material da peça e da ferramenta, das dimensões e dos fluidos de corte. O seu valor é igual à velocidade de corte que dá à ferramenta um tempo de vida de 1 minuto;

$Y$  = Expoente cujo valor depende até certo ponto de outras variáveis (máquina, ferramenta e peça). O expoente  $y$  varia normalmente entre 1/3 e 1/10, podendo assumir valores médios os indicados na Tabela 2. O valor do mesmo mostra o quanto é sensível a ferramenta à mudança de  $V_c$ .

$$T = \left(\frac{C_t}{V_c}\right)^x = \frac{K}{V_c^x} \quad \therefore \quad K = C_t^x \quad (7)$$

Isto é, a vida da ferramenta varia no sentido inverso com a potência de “x” da velocidade. [18]

Tabela 2 Valores dos expoentes  $x$  e  $y$  [18]

Ferramenta	Peça	x	Y = 1/x
<b>Aço – rápido (AR)</b>	Aço	6 a 8	0,125 a 0,167
	Fofo	4 a 7	0,143 a 0,25
	Latão	4	0,25
	Cobre	7,7	0,13
	Alumínio	2,44	0,41
<b>Metal – duro (MD)</b>	Aço	5	0,2
	Fofo	4	0,25
	Alumínio	2,44	0,41
<b>Cerâmica</b>	Aço	2	0,5

A vida da ferramenta é influenciada pelas dimensões do corte, para uma dada velocidade de corte. Em 1954, KRONENBERG procurou associar as equações das velocidades de

cutre de diferentes investigadores que tinham em conta a forma e a seção de corte. Sendo assim, podem ser introduzidas duas relações: [18]

- rea da seção transversal de corte ( $A = a_p \cdot f$ ) e
- ndice de esbeltez da apara ( $G = \frac{a_p}{f}$ ).

Portanto, a equação de Taylor pode ser escrita novamente: [18]

$$T = \left(\frac{C_t}{V_c}\right)^x = \left[\frac{60^y \cdot C_v \cdot (0,2 \cdot G)^g}{V_c \cdot A^i}\right]^x \quad (8)$$

Em que  $K = C_t^x = [60^y \cdot C_v \cdot \frac{(0,2 \cdot G)^g}{A^i}]^x$  e: [18]

$C_v$  = Velocidade de corte obtida de forma experimental, que confere à ferramenta de corte uma vida padrão de 60 minutos de maquinação de uma seção  $A = 1\text{mm}^2$ , com  $G = 5$ . (Valores de  $C_v$  na Tabela 3);

$i$  = Expoente da área da seção de corte, tabela 4;

$g$  = Expoente do ndice de esbeltez da apara, tabela 4.

A rea  $A$  tem um efeito superior do que a forma, que se caracteriza pelo ndice  $g$ , pois  $i > g$ . [18]

Tabela 3 Valores de  $C_v$  para as ferramentas de aço – rápido (AR) e metal – duro (MD) [18]

Dureza Brinell	Tensão de Rutura	$C_v$ na maquinação de aço		$C_v$ na maquinação de ferro fundido c/ ferramenta de:	
		c/ ferramenta de:		ferramenta de:	
HB	$\sigma_r$ [N/mm <sup>2</sup> ]	AR	MD	AR	MD
100	350	85	361	50	240
125	440	64	283	40	200
150	530	51	224	35	160
175	610	42	183	30	130
200	700	34	150	25	100
225	790	30	133	20	80
250	870	26	113	---	60
275	960	23	101	---	45
300	1050	20	89	---	45
325	1170	---	84	---	---
350	1220	---	76	---	---
375	1230	---	68	---	---
400	1400	---	63	---	---

Tabela 4 Valores dos expoentes  $i$ ,  $g$  e  $y$  para as ferramentas de aço – rápido e metal – duro [18]

Ferramenta	Material	$C_v$ [m/min]	$i$	$g$	$y = 1/x$
<b>Aço – rápido (AR)</b>	Aço	Tabela 3	0,28	0,14	0,125 a 0,167
	Ferro Fundido		0,20	0,10	0,143 a 0,25
	Latão	100	0,31	0	0,25
	Cobre	45	0,23	0	0,13
	Alumínio	77	0,29	0	0,41
<b>Metal – duro (MD)</b>	Aço	Tabela 3	0,28	0,14	0,20
	Ferro Fundido		0,20	0,10	0,25
	Latão	1000	0,10	0	---
	Cobre	850	0,10	0	---
	Alumínio	1650	0,10	0	0,41

### 2.3.3.1. Avarias das Ferramentas

Consideram-se como avarias da ferramenta as quebras, fissuras, sulcos distribuídos em forma de pente e as deformações plásticas que ocorrem no lado cortante durante a maquinação. A ferramenta de corte é solicitada térmica e mecanicamente durante a maquinação. Como nem o material da peça, nem o material da ferramenta são homogêneos, uma série de avarias e desgastes de naturezas distintas podem ser observadas na ferramenta de corte ao longo da sua utilização. [19]

As ocorrências do desgaste das ferramentas de corte dependem das condições de corte como: [19]

- O material envolvido no processo de maquinação;
- As dimensões e geometria da ferramenta;
- A refrigeração da ferramenta;
- A velocidade de corte;
- A profundidade de corte;
- O avanço da ferramenta.

#### Quebras:

A rutura da ponta da ferramenta é originada pela ação de grandes forças de maquinação nos seguintes casos: [19]

- Ângulo de gume;

- Material de corte quebradiço;
- Corte interrompido;
- Paragem instantânea do movimento de corte sem a retirada prévia da ferramenta da peça.

Logo quebra, pode estar associada a todos os tipos de desgaste e avaria das ferramentas de corte. Em alguns casos, a quebra da ferramenta pode ocorrer inesperadamente devido à dureza e carregamento excessivo sobre a ferramenta, geometria inadequada, entre outros motivos. A quebra da ferramenta pode causar, além de danos na pastilha, avarias no porta ferramentas ou na própria peça. [19]

As pequenas quebras da aresta cortante aparecem quando o material da peça apresenta incrustações duras. Esta situação ocorre frequentemente na aplicação de pastilhas de material cerâmico e de carbonetos duros. Por outro lado, ferramentas tenazes, com menos resistência à compressão (como por exemplo, as de aço rápido), são menos sensíveis à quebra. Porém estas ferramentas deixam reconhecer uma deformação na superfície de saída (na zona de contato aparta-ferramenta), quando sujeitas a grandes esforços de corte, além de apresentarem uma vida inferior às anteriores. [19]

#### Fissuras Devido a Variação de Temperatura:

Este tipo de fissura ocorre principalmente em pastilhas de carboneto pouco tenazes e os fatores que contribuem para a sua formação são os seguintes: [19]

- Variações bruscas de temperatura: a região da ferramenta onde a temperatura é mais alta é aquela em contato com o material removido, nas zonas mais distantes a temperatura é inferior e por esse motivo a ferramenta dilata-se e deforma-se de maneira desigual, e, além disso, aparecem as tensões de flexão na pastilha.
- Soldadura da pastilha na haste de uma ferramenta: as pastilhas soldadas também se podem deformar de forma desigual em relação ao material da peça e estão sujeitas a tensões de corte na superfície de contato pastilha-ferramenta.

Devido à sua associação com carregamentos variáveis, ocorre predominantemente em processos de corte interrompido, cujo exemplo clássico é a fresagem. Estas avarias podem ser evitadas através da escolha de uma ferramenta mais tenaz, com menor avanço por dente e corretamente posicionada em relação à peça. [19]

### Sulcos Distribuídos em Forma de Pente:

Os sulcos distribuídos em forma de pente fragilizam a aresta cortante e facilitam o aparecimento das fissuras de origem mecânica, que acabam por comprometer a vida útil da ferramenta de corte. Elas aparecem no corte interrompido na maquinação com avanço variável e no acesso irregular da refrigeração de corte. Tais ocorrências provocam uma variação da temperatura de corte. São observadas com frequência na operação de fresagem com pastilhas de metal duro. [19]

### Quebrar em lascas:

Resultante da quebra de pequenos fragmentos do gume durante a operação de corte. A Principal causa da lascagem é o limite de resistência do material da ferramenta excedido em áreas localizadas devido a vibrações, variações microestruturais na peça. Forças de corte excessivas muitas vezes levam a micro e macro lascagem do gume ou da aresta, principalmente quando os ângulos de gume ou da aresta da ferramenta são muito pequenos. Este tipo de avaria ocorre principalmente em ferramentas com material frágil ou com baixa seção resistente (ângulo de gume), prejudicando o acabamento superficial da peça e causando, em casos extremos, a quebra da ferramenta. [20]

### Fissuras Transversais, Longitudinais ou em Forma de Pente:

Em cortes interrompidos, o gume da ferramenta é submetido a solicitações térmicas e mecânicas alternadas. Estas solicitações alternadas em conjunto com as tensões de tração residuais na superfície da ferramenta, durante o ciclo de refrigeração, podem levar ao aparecimento de fissuras transversais e longitudinais ao gume, principalmente em materiais de ferramentas com pouca tenacidade. [20]

### Deformação Plástica do Gume:

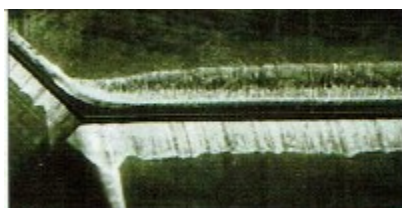
Ocorre quando o material da ferramenta amolece devido às altas temperaturas e quando está sujeito a forças de maquinação. Estas deformações plásticas também ocorrem em metais-duros e Cermets, no entanto são necessárias temperaturas mais elevadas, do que nas ferramentas de aço rápido e aço ferramenta. Metais-duros têm tendência a maiores deformações quanto maior for o teor de ligante, especialmente cobalto. [20]

### 2.3.3.2. Tipos de Desgaste

A ferramenta de corte é pedida térmica e mecanicamente durante a maquinação. Como o material da peça e da ferramenta não são homogêneos, podem ocorrer vários desgastes de naturezas distintas que podem ser observados na ferramenta de corte ao longo de sua utilização. Para evitar que ocorra o colapso total da ferramenta é fundamental que sejam estabelecidos limites os desgastes da face de saída e em cratera. [20]

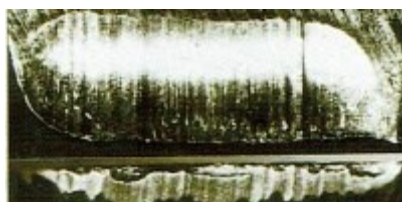
Os tipos de desgaste são os seguintes:

1. Desgaste da face de saída (ou frontal) - O desgaste da face de saída (Figura 15) ocorre na face de ataque da ferramenta, causado pelo contato entre a ferramenta e a peça. É o tipo mais comum de desgaste. Ocasiona a deterioração do acabamento superficial da peça, pois modifica totalmente a aresta de corte original. Faz com que a peça mude de dimensão. Baixa qualidade da ferramenta, velocidade de corte demasiado alta, ângulo de ataque demasiado pequeno e avanço extremamente baixo. [21 e 22]



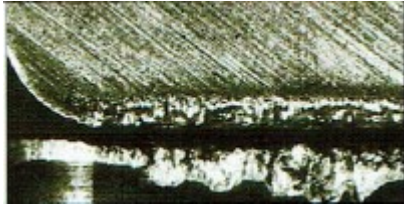
*Figura 15 Desgaste da face de saída [22]*

2. Desgaste em cratera - O desgaste da cratera (Figura 16) ocorre na face de ataque da ferramenta, causado pelo atrito entre a ferramenta e o material removido. O desenvolvimento deste tipo de desgaste está diretamente ligado à temperatura e à pressão de corte. Baixa qualidade da ferramenta, velocidade de corte e avanço demasiado altos. Este tipo de desgaste não influencia diretamente na rugosidade ou na tolerância da peça, mas sim na geometria do ângulo de saída e no comprimento de contato material removido-peça. O crescimento do desgaste da cratera pode gerar a quebra da ferramenta, quando tal desgaste se encontra com o desgaste da face de saída. [21 e 22]

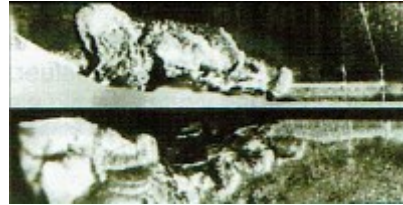


*Figura 16 Desgaste da cratera [22]*

3. Micro - ruturas e ruturas – As ruturas (Figuras 17 e 18) podem ocorrer abruptamente devido a alguns fatores: qualidade da ferramenta demasiado dura, avanço demasiado alto, perda da resistência da aresta de corte e perda da rigidez da ferramenta. Causa dano à ferramenta, mas também ao porta-ferramenta e à própria peça. [21 e 22]



*Figura 17 Micro – ruturas [22]*



*Figura 18 Ruturas [22]*

4. Deformação plástica da aresta de corte - Gerada pela pressão aplicada à ponta da ferramenta, somada às altas temperaturas. Baixa qualidade da ferramenta, velocidade de corte demasiado alta, profundidade de corte e avanço excessivos e alta temperatura de corte. A deformação na aresta (Figura 19) de corte provoca deficiência no controlo do material removido e deterioração do acabamento da peça. O crescimento desta deformação pode causar a quebra da ferramenta. É evitada pelo uso de uma ferramenta com maior dureza a quente, ou pela mudança nas condições de maquinação (diminuição dos esforços e da temperatura) ou modificação na geometria da ferramenta. [21 e 22]



*Figura 19 Deformação plástica [22]*

5. Fissuras da aresta de corte – As fissuras (Figura 20) são causadas pela variação da temperatura (origem térmica – perpendicular à aresta) ou variação dos esforços mecânicos (origem mecânica paralela à aresta). A baixa velocidade de corte, qualidade inapropriada, corte interrompido, acesso irregular do fluido de corte, solda da pastilha no porta-ferramentas são as principais causas das fissuras da aresta de corte. Pode ser evitada através da escolha de ferramentas mais tenazes e redução do avanço por dente. [21]

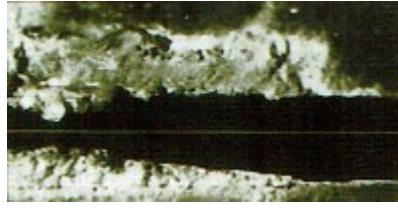


Figura 20 Fissuras da aresta de corte [22]

6. Ruptura térmica – Ocorre devido à expansão e contração devido ao calor durante o processo de corte (Figura 21). A ferramenta apresenta baixa tenacidade. [22]

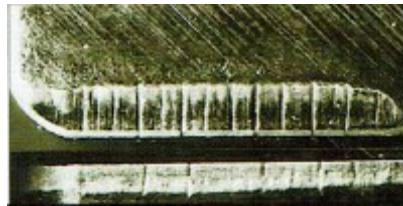


Figura 21 Ruptura térmica [22]

7. Rebaixo – Ocorre quando superfícies duras, peças rapidamente arrefecidas e camadas endurecidas por maquinação (Figura 22). Fricção causada por aparas irregulares (causada por uma pequena vibração). [22]



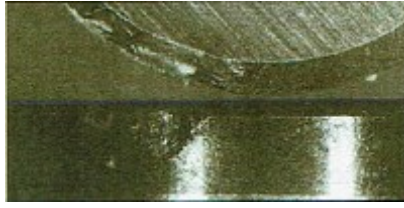
Figura 22 Rebaixo [22]

8. Ruptura da apara postiça de corte – Adesão na aresta de corte (é necessário o aumento do ângulo de ataque para um corte mais suave). Deficiente evacuação das aparas (Figura 23). [22]



Figura 23 Ruptura da apara postiça de corte [22]

9. Desgaste da face de saída / ruptura (rupturas típicas de policristalinos) – Dano devido à falta de resistência de uma aresta arredondada (Figura 24). [22]



*Figura 24 Desgaste da face de saída / rutura [22]*

10. Desgaste da cratera na face de ataque / rutura (rutura típicas de policristalinos) – Baixa qualidade da ferramenta (Figura 25). Devido à elevada resistência de corte, gera-se muito calor. [22]



*Figura 25 Desgaste da cratera / rutura [22]*

#### 2.3.3.3. Mecanismos de Desgaste

Relativamente aos mecanismos de desgaste temos quatro tipos: adesão, abrasão, difusão e oxidação.

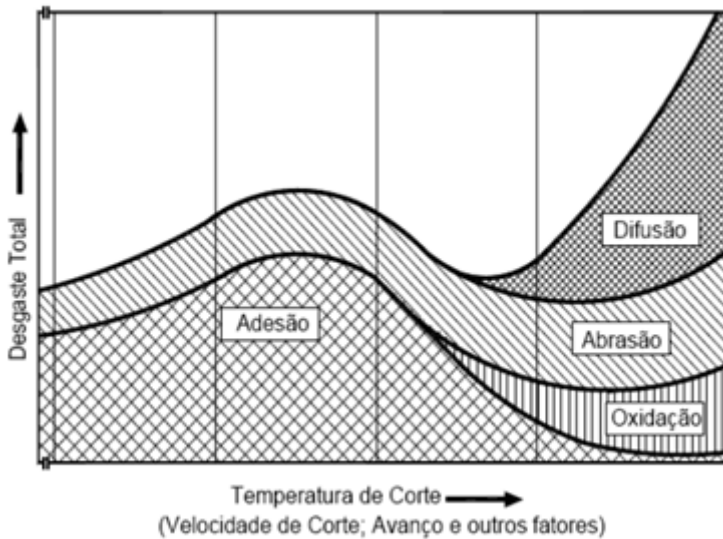
Na adesão / aresta postiça de corte, a baixas temperaturas de corte, pode ocorrer o fenómeno de formação de um extrato metálico entre duas superfícies em contato, no qual ocorre a “migração” de partículas de uma superfície para a outra. Tem como principais características contribuir para formação do desgaste de entalhe; pode ser minimizado pelo uso adequado do fluido de corte (lubrificação) e o uso de materiais de ferramenta com baixo coeficiente de atrito. [21]

A abrasão gera-se pelo atrito entre as superfícies em contato. As características principais são: Ocorre no desgaste de face de saída e de cratera. Mais elevada no desgaste da face de saída, já que a superfície de folga entra em atrito com um elemento rígido (peça). [21]

A difusão é um fenómeno microscópico que consiste na transferência de átomos de um metal para o outro, ativada pela temperatura de corte e pela afinidade físico-química dos dois metais envolvidos. As características importantes são o facto de ocorrer principalmente na superfície de saída (altas temperaturas), sendo o principal mecanismo para formação do desgaste da cratera. [21]

A oxidação é fenómeno que ocorre a altas temperaturas e na presença de ar e água (contida no fluido de corte). Provoca a formação de óxidos porosos na superfície da ferramenta, que são facilmente levados pelo atrito. Tem como características, o facto de se formar especialmente nas extremidades da apara, devido ao acesso do ar/fluido nesta região. Fundamental para o desgaste de entalhe. [21]

Na Figura 26 é apresentado um esquema com os diferentes mecanismos de desgaste das ferramentas de corte.



Principais relações:

Desg. da face de saída → abrasão

Desg. da cratera na face de ataque → difusão

Desg. entalhe → oxidação

Figura 26 Mecanismos de desgaste [21]

Ao longo do capítulo 2 foi feita uma pesquisa bibliográfica que pretendia compreender conceitos fundamentais no processo de maquinação com ferramentas de corte com insertos PCD na maquinação de grafite. Nos próximos capítulos será abordada a parte prática do trabalho.

### **3. Materiais e Metodologia**

---

O trabalho experimental realizado no âmbito deste projeto, foi desenvolvido em parceria com a empresa Araújo e Silva, e o seu principal objetivo consistiu em ensaiar e analisar ferramentas de corte com insertos em diamante policristalino de modo a identificar os parâmetros ideais de utilização destas ferramentas na maquinação de grafite.

### 3.1. Produção de Ferramentas

---

Para a realização deste estudo foram produzidas dezoito ferramentas de corte distintas, as quais foram colocadas em utilização posteriormente de modo a permitir a avaliação do seu comportamento durante e após um determinado período de tempo, com a utilização de parâmetros previamente definidos.

As ferramentas foram produzidas na empresa Araújo & Silva Lda e o seu processo de produção foi composto pelas seguintes fases:

1. Corte do buril;
2. Abertura de rasgos no buril de suporte (extração e suporte do inserto);
3. Corte por erosão por fio (WEDM) dos diferentes insertos de PCD;
4. Processo de ligação do inserto com o corpo de suporte;
5. Conceção do perfil de corte / afiação;
6. Jato de areia;
7. Medição final;
8. Identificação da ferramenta (gravação laser).

A produção da ferramenta começa com o corte do buril de carboneto de tungsténio para o seu comprimento final de 125 mm, visto que provém do fornecedor sob a forma de varões de 325 mm de comprimento com o diâmetro de 8 mm. Após o corte é iniciada a fase de abertura dos rasgos na máquina Schneeberger Aries como mostra a Figura 27. Esta máquina CNC permite a afiação e maquinação de vários materiais utilizando mós abrasivas como ferramenta de corte. Estes rasgos, que posteriormente vão suportar o inserto em PCD, são realizados de modo a que os cortantes fiquem alinhados com o centro do buril e a permitir uma boa extração da apara. [23]



*Figura 27 Abertura de rasgos no buril de suporte [23]*

Os insertos são preparados durante o processo de abertura dos rasgos de suporte. Como o PCD vem do fornecedor em discos com um diâmetro de 76 mm e 1 mm de espessura, é necessário proceder ao corte dos mesmos para o seu perfil aproximado. Para tal, como mostra a Figura 28, é utilizado um processo de WEDM assistido por CAD/CAM de modo a executar o seu corte. [23]

O processamento de materiais de dureza elevada é normalmente difícil pelos métodos tradicionais de maquinação, pois envolve o uso de máquinas e ferramentas de corte com um custo elevado, entre outros aspetos. Neste sentido, a maquinação por eletroerosão por fio (Wire Electrical Discharge Machining - WEDM) apresenta-se como um processo muito vantajoso para a produção de ferramentas, sendo que não existe contato mecânico entre a ferramenta e a peça. Assim sendo, existe um fio bobinado que se desenrola de forma contínua durante a maquinação e é utilizado como ferramenta, sendo a peça produzida através movimento entre o fio e a peça. A remoção de material ocorre através de fenómenos térmicos gerados por descargas elétricas entre o eléctrodo - ferramenta e o eléctrodo - peça. Assim, as propriedades mecânicas do material da peça como, por exemplo, a dureza não afetam a sua maquinação. [24]



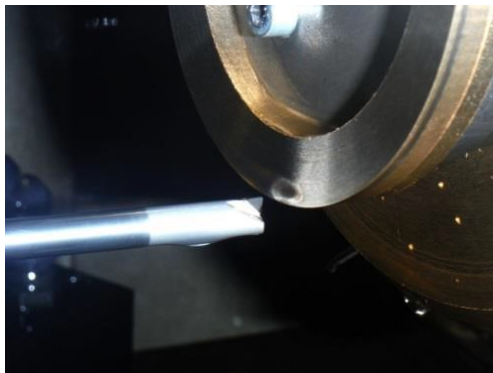
*Figura 28 Processo de corte dos insertos por WEDM [23]*

Depois de concluídas as fases anteriores, segue-se o processo de ligação entre o inserto e o corpo de suporte. Para tal é utilizado um processo de brasagem forte por indução, como se pode ver na Figura 29. Este processo decorre a uma temperatura entre os 680°C e 705°C, sendo o ligante uma liga de prata – cobre. [23]



*Figura 29 Processo de brasagem forte por indução [25]*

Seguidamente, as ferramentas passam por um processo de decapagem de modo a remover os excessos de ligante e outros produtos gerados durante o processo de brasagem. A ferramenta segue, então, para o processo de conceção do perfil de corte. Para tal é inserida numa máquina de eletroerosão, que utiliza um disco rotativo como eléctrodo, gerando assim o perfil de corte pretendido, como se pode ver na Figura 30. [23]



*Figura 30 Processo de conceção do perfil de corte (EDM) [23]*

A fase seguinte é a projeção de um jato de areia de sílica sobre as peças, com o objetivo de: remover oxidações (ferrugem) e impurezas inorgânicas; crostas de fundição e incrustações superficiais; reduzir a rugosidade para posteriores tratamentos (metalização e/ ou pintura). [26]

Posteriormente, segue-se a medição do perfil de corte de modo a avaliar se a ferramenta está geometricamente conforme. Para tal é utilizado um instrumento de medição ótica, o

Speroni, como se pode ver na Figura 31. No caso deste estudo, foi medido o diâmetro final e respetivo raio de canto das ferramentas de corte. [23]



*Figura 31 Processo de medição final [23]*

Por último, as ferramentas são identificadas com o respetivo diâmetro, referência e logotipo da empresa através de um processo de gravação por LASER, no equipamento da marca Foba do modelo LAS D84S (Figura 32). [23]



*Figura 32 Resultado final das ferramentas [23]*

## **3.2. Definição do Número de Ferramentas (DOE)**

---

Numa primeira fase houve necessidade de proceder à definição do número de ferramentas que seriam possíveis fabricar e analisar, e onde pudéssemos identificar os principais parâmetros de maquinação. Para tal recorreu-se, à utilização método Desenho ou Planeamento de Experiências (DOE).

O DOE é uma técnica estatística utilizada no estudo da otimização dos mais variados tipos de processos de maquinação e materiais nos diferentes cenários de manufatura. [27]

A primeira abordagem sobre o DOE foi feita por R.A. Fisher em meados do século passado, em Inglaterra. Pretendia focar-se na resolução de problemas relacionados com a agricultura e desde então têm sido desenvolvidos vários desenhos de experiências com aplicações às mais variadas indústrias. [27]

Em relação aos desenhos podem existir vários tipos de experiências, desde as mais simples (desenho com um fator a vários níveis em que o nível de um determinado fator é feito variar observando-se o impacto no resultado - efeito) até às mais complexas (planeamento fatorial completo e planeamento fatorial fracionado ou método de Taguchi, nome do engenheiro e matemático japonês que o desenvolveu no início dos anos 60 do século XX). [27]

Na maioria das vezes, o número de experiências abrangidas no desenvolvimento de novos produtos ou processos é excessivo, sendo que a aplicação do método de Taguchi, permite obter informação relevante sobre o efeito dos fatores, efetuando-se o mínimo de experiências possíveis. [27]

Esta metodologia tem grande sucesso na sua aplicação devido à escolha certa dos fatores de controlo e respetivos níveis. Para tal é necessário um bom conhecimento dos processos e a realização de alterações definidas e sistemáticas nas principais variáveis de controlo (fatores) de modo a que se possa observar a alteração que as mesmas irão provocar no resultado final (resposta). É essencial uma adequada seleção do DOE a utilizar caso a caso, de modo a assegurar: [27]

- A condução das experiências de acordo com as melhores práticas disponíveis;
- A interpretação dos respetivos resultados avaliando os efeitos produzidos pelos fatores em termos da variação.

Antes da aplicação do DOE é necessário fazer uma abordagem para que a sua aplicação tenha resultados positivos. O esquema apresentado na Figura 33 permite resumir as principais etapas que se devem ter em conta na fase de planeamento das experiências. [28]

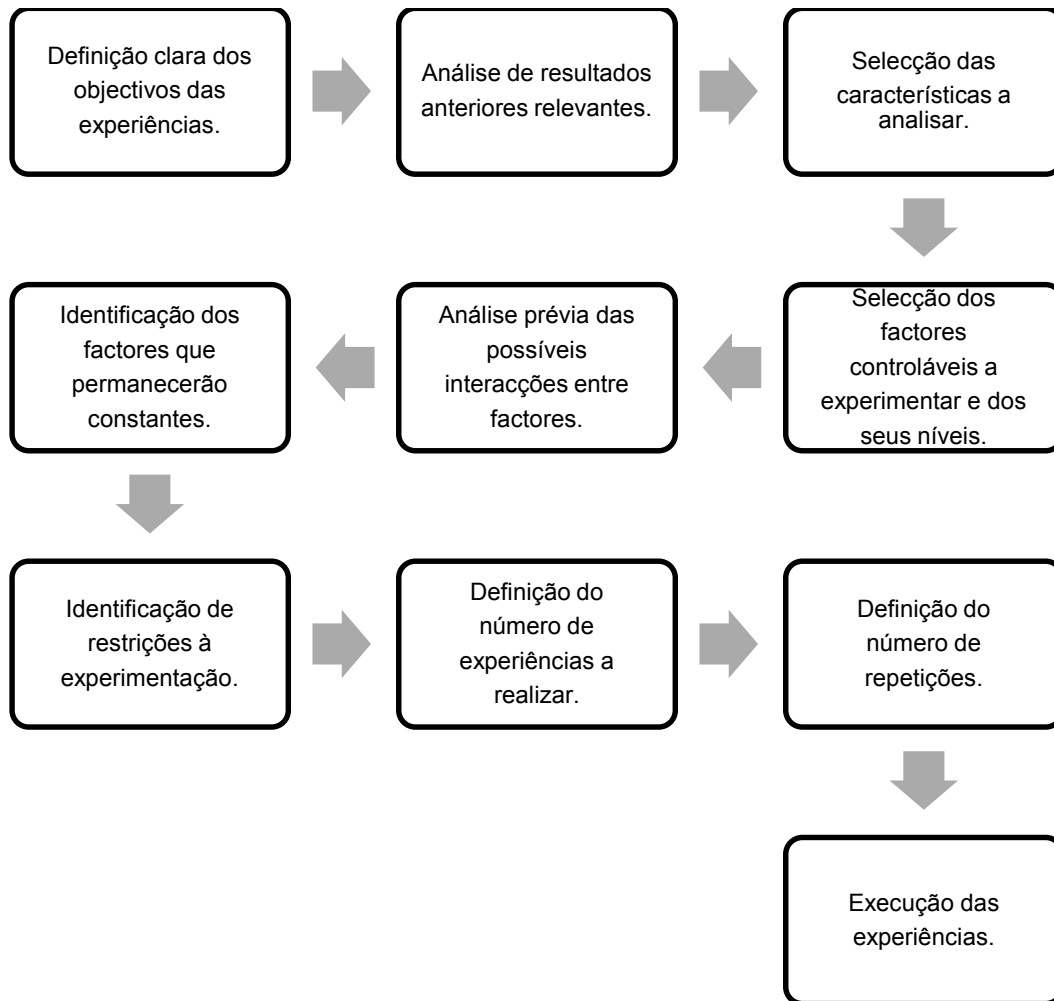


Figura 33 Esquema da abordagem para a aplicação do DOE [28]

Depois de realizadas as experiências deve-se utilizar a análise de variância para o tratamento estatístico dos resultados obtidos. Esta análise de variância permite identificar, de forma clara, quais os fatores e/ou interações que afetam de forma significativa as respostas. [28]

A seguir à identificação dos fatores (isolados ou em interação), define-se qual a melhor combinação de níveis dos fatores que irá levar à maximização dos objetivos pré estabelecidos. [28]

Existem várias estratégias de experimentação para estudar a influência de tratamentos ou fatores sobre determinado sistema (e conseqüentemente sobre uma dada variável-resposta). A mais correta, nos casos que envolvem vários fatores, é realizar uma experiência fatorial, na qual variam simultaneamente todos os (níveis dos) fatores em estudo ao invés de analisar um fator de cada vez. Neste caso, estuda-se continuamente o efeito sobre a variável-resposta de cada um dos fatores mantendo os restantes constantes. A maior desvantagem da estratégia um-fator-de-cada vez, que é muito

comum na prática industrial, é não permitir estudar as possíveis interações entre fatores. Por outro lado, a estratégia de um-fator-de-cada-vez é sempre menos eficiente do que uma experiência fatorial. [29]

De entre os vários desenhos de experiências existentes, no presente trabalho, apenas irá ser objeto de estudo e aplicação o desenho fatorial fracional.

A utilização da técnica de fracionamento de experiências permite que as respostas para as questões investigadas sejam obtidas apenas com a realização de uma fração da experiência, explorando-se a redundância existente quando são considerados muitos fatores numa experiência. Essa redundância origina-se em efeitos desprezíveis, tanto principais como de interação entre os fatores. [30]

Quando são introduzidos fatores que não têm influência na variável de resposta aparecem os chamados efeitos principais desprezíveis. No entanto, observa-se que os efeitos de interação entre os fatores obedecem a uma certa hierarquia em termos de magnitude absoluta, sendo que os efeitos principais dos fatores geralmente apresentam valores maiores que os efeitos de interação entre dois fatores, que por sua vez tendem a apresentar valores superiores aos efeitos de interação entre três fatores, e assim sucessivamente. Dessa forma, interações de alta ordem, por exemplo, interações entre quatro fatores, tendem a tornar-se desprezíveis, podendo ser desprezadas. [30]

O planeamento fatorial fracionário baseia-se na exploração dessa redundância, para diminuir o número de ensaios numa experiência, utilizando o sistema de confundir (“*confounding*”). Neste sistema os efeitos das variáveis de entrada ou fatores encontram-se associados, podendo-se realizar apenas uma fração da experiência, com base na consideração de que interações de alta ordem podem ser desprezadas. [30]

As experiências fatoriais fracionárias são representadas por  $wk-p$ , sendo  $w$  o número de níveis dos fatores,  $k$  o número de fatores e  $p$  o expoente de fracionamento. Experiências fracionárias com fatores em dois níveis são designadas por  $2k-p$ , sendo que a fração extraída da experiência fatorial é  $2^{-p}$ . [30]

Considera-se uma experiência fatorial, uma experiência que envolve  $k$  fatores, todos com dois níveis de variação. A experiência fatorial completa compreenderia  $2k$  condições experimentais ou tratamentos e através da realização dessa experiência poderiam ser determinados  $2k-1$  efeitos, nos quais estariam incluídos efeitos de interação de alta ordem. [30]

Se se optar por realizar uma experiência fracionária, pode-se diminuir o número de condições experimentais a serem testadas para  $2k-p$ , o que corresponde a uma fração de  $1/2^p$  da experiência completa. Essa redução implica conseqüente a redução do número de efeitos que podem ser determinados, que passa a ser igual a  $2(k-p) - 1$ . Devido ao fracionamento haverá a junção de efeitos principais com efeitos de interação entre fatores, e de efeitos de interação entre si. [30]

Uma experiência fatorial fracionária é criada através de uma experiência fatorial completa para  $k-p$  fatores, ou seja, construindo-se uma experiência  $2k-p$ , e posteriormente juntando-se os efeitos principais dos  $p$  fatores não utilizados para montar a experiência a alguns dos efeitos de interação entre os  $k-p$  fatores. Dessa forma cada um dos  $p$  fatores será adicionado à experiência sem que ocorra aumento do número de condições experimentais a serem testadas, fazendo os níveis coincidirem com uma das colunas de sinais representativas das interações entre os  $k-p$  fatores. Como resultado do fracionamento, os efeitos das interações utilizadas para introdução dos  $p$  fatores estarão confundidos com os efeitos principais desses  $p$  fatores. [30]

Os padrões de acoplamento são determinados pela relação que define a experiência fatorial fracionária, que por sua vez é obtida a partir das relações que se geram e das suas multiplicações dois a dois, três a três e assim por diante, incluindo todas as combinações possíveis. Estas relações de uma experiência fatorial fracionária  $2k-p$  são aquelas que associam os níveis das  $p$  variáveis às interações das  $k-p$  variáveis utilizadas para a montagem da experiência. [30]

A resolução de uma experiência é o seu grau de fracionamento, sendo inversamente proporcional a essa, ou seja, quanto maior a resolução de uma experiência menor é o grau de fracionamento e conseqüentemente menor é o acoplamento de efeitos. [30]

Normalmente, quando a experiência reúne fatores quantitativos e qualitativos, e existe a possibilidade dos fatores qualitativos possuírem três ou quatro níveis diferentes, pode haver a necessidade de se introduzir numa experiência fatores que possuem mais do que dois níveis de variação. Experiências onde os fatores não ocorrem todos no mesmo nível são chamadas experiências fatoriais assimétricas. [30]

O planejamento e a análise de experiências com fatores em níveis variados devem ser realizados com relativa simplicidade e funcionalidade, para tal convém ajustar os fatores com mais de dois níveis de variação em planejamentos fatoriais em dois níveis  $2n$ . Sendo assim, é necessária a transformação de fatores com três ou quatro níveis em dois fatores com dois níveis de variação. [30]

Através desta técnica, e numa primeira fase, definiram-se os parâmetros que iriam ser considerados na análise, nomeadamente a velocidade de avanço, a velocidade de corte, o incremento em profundidade, o diâmetro da ferramenta, o número de navalhas e o tipo de PCD. Para isto tivemos de considerar um valor máximo, um valor mínimo e um valor intermédio para cada parâmetro, como podemos verificar na Tabela 5:

Tabela 5 Definição dos parâmetros para aplicação

	-1,00	0,00	1,00
<b>Vf</b>	3,00	3,50	4,00
<b>V</b>	94,56	125,65	150,80
<b>Ap</b>	0,10	0,30	0,50
<b>D<sub>tool</sub></b>	4,30	8,00	12,00
<b>Nav</b>	2,00	2,00	2,00
<b>PCD</b>	1,00	2,00	3,00

Estes parâmetros foram definidos em conjunto com a empresa Araújo e Silva, onde se chegou aos diâmetros das ferramentas e aos três tipos de PCD que iríamos analisar e tendo em conta o catálogo GIVING TOOLMAKERS A COMPETITIVE EDGE da *ElementSix* como podemos verificar na Figura 34:

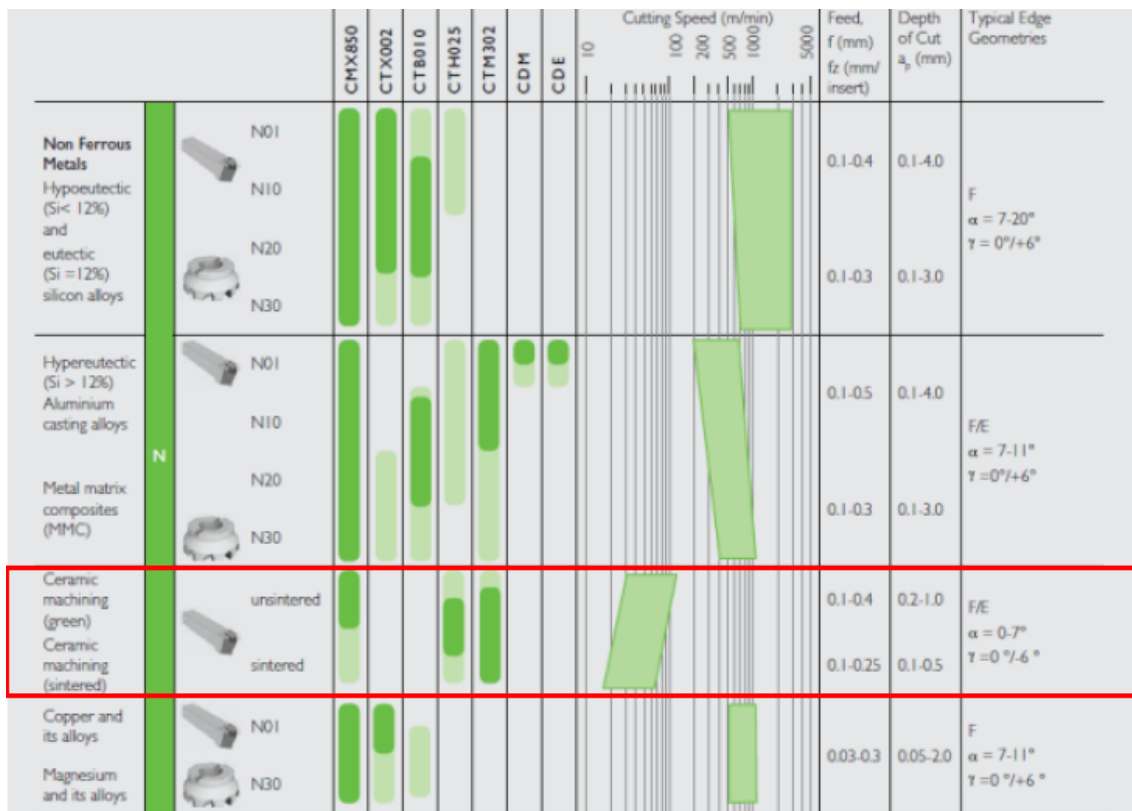


Figura 34 Parâmetros de maquinação recomendados para PCD

Assim, aplicando o método DOE foram identificadas dezoito ferramentas que, em conjunto com a empresa Araújo e Silva, foram consideradas um número de ferramentas para teste razoáveis tendo em conta o tempo disponível para a realização do projeto. Na Tabela 6, podem identificar-se as dezoito ferramentas com os respetivos parâmetros de maquinação.

As ferramentas foram identificadas da seguinte forma: xx M yy, em que xx é o diâmetro da ferramenta e yy é o número da ferramenta correspondente ao diâmetro.

Tabela 6 Aplicação do método DOE

Referência	Vf	V	ap	Dtool	Nav	PCD	Vf (m/min)	V (m/min)	ap (mm)	Dtool (mm)	Nav	PCD	N (RPM)	Fz (mm/rot)	Fz/Z (mm/dente)	Vf (mm/min)
04 M 01	-1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000	3	94,56	0,1	4	2	1	7000	0,21	0,105	1470
04 M 02	1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000	4	94,56	0,1	4	2	1	7000	0,29	0,145	2030
04 M 03	-1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000	3	150,8	0,5	4	2	1	11163	0,13	0,065	1451,19
04 M 04	1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000	4	150,8	0,5	4	2	1	11163	0,18	0,09	2009,34
04 M 05	-1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000	3	150,8	0,1	4	2	3	11163	0,13	0,065	1451,19
04 M 06	1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000	4	150,8	0,1	4	2	3	11163	0,18	0,09	2009,34
04 M 07	-1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000	3	94,56	0,5	4	2	3	7000	0,21	0,105	1470
04 M 08	1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000	4	94,56	0,5	4	2	3	7000	0,29	0,145	2030
12 M 01	1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000	4	94,56	0,5	12	2	1	2508	0,8	0,4	2006,4
12 M 02	-1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000	3	94,56	0,5	12	2	1	2508	0,5	0,3	1504,8
12 M 03	1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000	4	150,8	0,1	12	2	1	4000	0,5	0,25	2000
12 M 04	-1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000	3	150,8	0,5	12	2	3	4000	0,38	0,19	1520
12 M 05	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	4	150,8	0,5	12	2	3	4000	0,5	0,25	2000
12 M 06	-1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000	3	150,8	0,1	12	2	1	4000	0,38	0,19	1520
12 M 07	1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	4	94,56	0,1	12	2	3	2508	0,8	0,4	2006,4
12 M 08	-1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000	3	94,56	0,1	12	2	3	2508	0,6	0,3	1504,8
8 M 01	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	3,5	125,66	0,3	8	2	2	5000	0,35	0,175	1750
8 M 02	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	3,5	125,66	0,3	8	2	2	5000	0,35	0,175	1750

Após esta fase, a empresa Araújo e Silva iniciou a produção das ferramentas, seguindo o procedimento descrito no capítulo 3.1, a qual foi sendo acompanhada.

De modo a identificar a geometria inicial das ferramentas, estas foram analisadas antes de entrarem serviço, ou seja, em processos de maquinação. Assim, à medida que as ferramentas estavam prontas foram-me sendo entregues para as poder analisar e posteriormente foram devolvidas à empresa Araújo e Silva, que as enviou para utilização nos seus clientes. Quando as ferramentas atingiam o seu fim de ciclo de vida em maquinação, ou seja, quando estas deixavam de estar aptas para maquinar, voltavam a ser analisadas. O critério pedido para os clientes utilizarem foi que quando as ferramentas perdessem 0,03mm do seu raio, estas estariam inaptas para maquinação.

As ferramentas foram analisadas no microscópio ótico Zeiss MC80 (Carl Zeiss, New York) dos laboratórios de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria (IPL) (Figura 35).



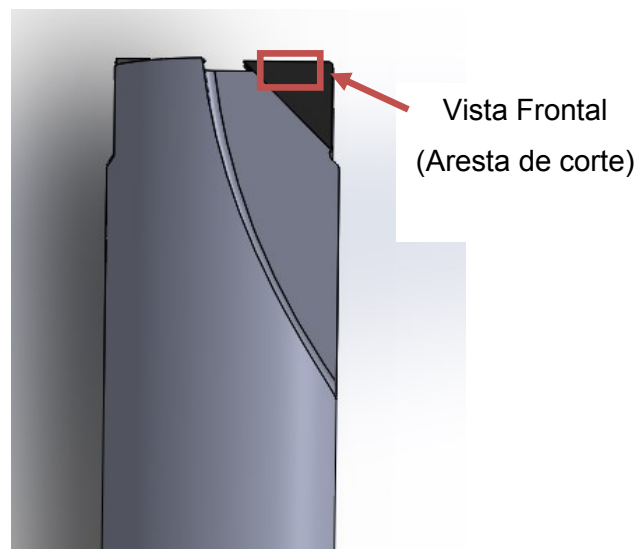
*Figura 35 Microscópio ótico Zeiss MC80 [22]*

Durante este procedimento de análise das ferramentas, foram identificadas algumas dificuldades que se relacionavam com a fixação das ferramentas no microscópio de modo a assegurar uma correta visualização das mesmas. Para ultrapassar essa limitação foi desenvolvido um suporte que permitiu fixar as ferramentas, como pode ser verificado na Figura 36:



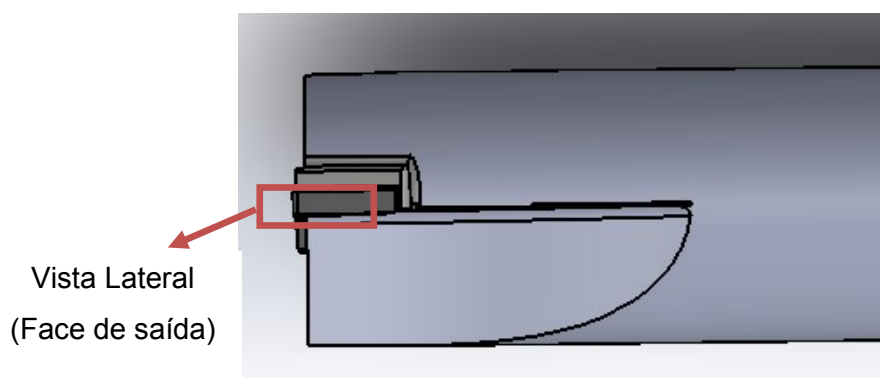
*Figura 36 Suporte de fixação das ferramentas*

Visto que as ferramentas iriam ser analisadas antes e após o processo de maquinação era necessário ter a certeza que estaríamos a comparar a mesma pastilha, para isso, e com a ajuda da empresa Araújo e Silva, foi gravado na ferramenta o respetivo código na direção de um dos insertos, o que me permitia identificar qual o inserto nº 1 e inserto nº 2. Procedeu-se essencialmente à visualização de duas zonas de modo a conseguir identificar o desgaste ocorrido em cada ferramenta. A vista frontal, esquematizada na Figura 37, permitiu a identificação do desgaste ocorrido na face de ataque da ferramenta, assim como a avaliação da aresta de corte.



*Figura 37 Esquema da vista frontal*

A vista lateral, esquematizada na Figura 38, teve como objetivo a visualização da forma de propagação do desgaste ocorrido ao longo da face de saída.




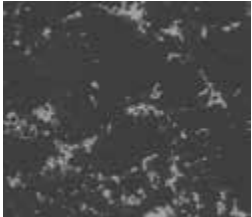
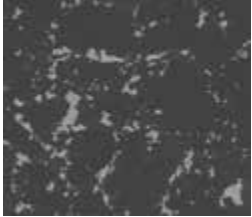
*Figura 38 Esquema da vista lateral*

### 3.3. Materiais Utilizados - Tipos de PCD

Foram utilizados, neste estudo, três tipos de diamante policristalino para o fabrico das ferramentas, sendo estes fabricados pela empresa Element Six. Os PCD utilizados foram CTB 010, CTH 025 e o CTM 302, onde as principais diferenças estão na sua granulometria e densidade.

A Tabela 7 mostra-nos a comparação entre algumas características fundamentais dos três tipos de PCD utilizados.

*Tabela 7 Comparação dos três tipos de PCD [31]*

<b>Grau</b>	<b>Aplicações</b>	<b>Características</b>	<b>Microestrutura</b>
<b>CTB 010</b>	Grau ideal onde o desgaste e o acabamento são realizados com uma única ferramenta. Recomendado para ferramentas de ligas de alumínio.	Tamanho médio do grão de 10 $\mu$ m. CTB010 é a classe PCD laboratorial ideal para muitas aplicações onde um bom equilíbrio de resistência e desgaste é necessário.	
<b>CTH 025</b>	Bem sucedido em maquinação de ligas de silício e alumínio, compósitos com matriz metálica (MMC), carbonetos de tungstênio e cerâmica.	Tamanho médio do grão de 25 $\mu$ m. CTH 025 oferece o desgaste e resistência ideais para condições de maquinação abrasiva.	
<b>CTM 302</b>	As áreas de aplicação incluem MMC, ligas de alumínio de alto silício, ferros fundidos e aplicações bimetálicas. Excelente resistência à abrasão e boa estabilidade térmica.	PCD multi - modal, com granulometrias de 2 $\mu$ m a 30 $\mu$ m que dá ao CTM 302 excelente resistência ao desgaste.	

## 4. Resultados Obtidos

De seguida será apresentado um esquema de comparação de imagens de cada ferramenta, onde se pretende visualizar o que aconteceu a cada ferramenta após terminarem o seu ciclo de vida em maquinação. Todas as ferramentas estiveram a maquinar até perderem 0,03 mm do seu diâmetro pois este é um valor utilizado como referência por muitas empresas, como limite à vida da ferramenta.

Este limite é usado em operações de acabamento, sendo contudo utilizado nas ferramentas, e em certos casos, para posteriores operações de desbaste.

Devido a problemas existentes em três ferramentas, estas ficaram inaptas para maquinação não obtendo qualquer resultado para análise. Estas ferramentas são a 04 M 01, a 04 M 03 e a 04 M 07.

As ferramentas 04 M 04, 12 M 06 e 12 M 08 continuaram em maquinação nas respetivas empresas onde efetuaram os testes para além do estipulado pelo critério (perderam 0,03 mm do seu diâmetro) pelo que não serão apresentadas as imagens do desgaste destas ferramentas.

### 1. Ferramenta 04 M 01

A ferramenta 04 M 01 contém insertos do tipo CTH 025, era para maquinar com os parâmetros apresentados na Tabela 8, no entanto ficou inapta para maquinação não se obtendo qualquer tempo de trabalho. Esta ferramenta teve um erro de produção por parte da empresa Araújo & Silva.

*Tabela 8 Parâmetros de maquinação da ferramenta 04 M 01*

Dados da ferramenta				Tipo de PCD	Propriedades		
<b>Diâmetro</b>	4 mm	<b>Referência</b>		CTH	<b>Tolerância <math>\varnothing</math></b>	<b>Sup./ Inf.</b>	00 $\mu$ / 00 $\mu$
<b>Raio Canto</b>	0,3 mm	04 M 01					
<b>Diâmetro de corte</b>		<b>Z (nº cort)</b>	<b>Fz</b>	<b>Vc</b>	<b>Rotação</b>	<b>Avanço Linear</b>	<b>Tempo de trabalho</b>
<b>Mm</b>		Unidade	mm/dente	m/Min	RPM	mm/min	minutos
<b>4</b>		2	0,105	94,56	7525	1580	-

## 2. Ferramenta 04 M 02

A ferramenta 04 M 02 contém insertos do tipo CTH 025 e esteve a maquinar com os parâmetros de maquinação presentes na Tabela 9 durante 2145 minutos.

Tabela 9 Parâmetros de maquinação da ferramenta 04 M 02

Dados da ferramenta				Tipo de PCD	Propriedades		
<b>Diâmetro</b>	4 mm	<b>Referência</b>		CTH	<b>Tolerância <math>\varnothing</math></b>	<b>Sup./ Inf.</b>	00 $\mu$ / -10 $\mu$
<b>Raio Canto</b>	0,3 mm	04 M 02					
<b>Diâmetro de corte</b>		<b>Z (nº cort)</b>	<b>Fz</b>	<b>Vc</b>	<b>Rotação</b>	<b>Avanço Linear</b>	<b>Tempo de trabalho</b>
<b>Mm</b>		Unidade	mm/dente	m/Min	RPM	mm/min	minutos
4		2	0,145	94,56	7525	2182	2145

De seguida podemos observar o desgaste dos dois insertos desta ferramenta:

- Inseto nº 1

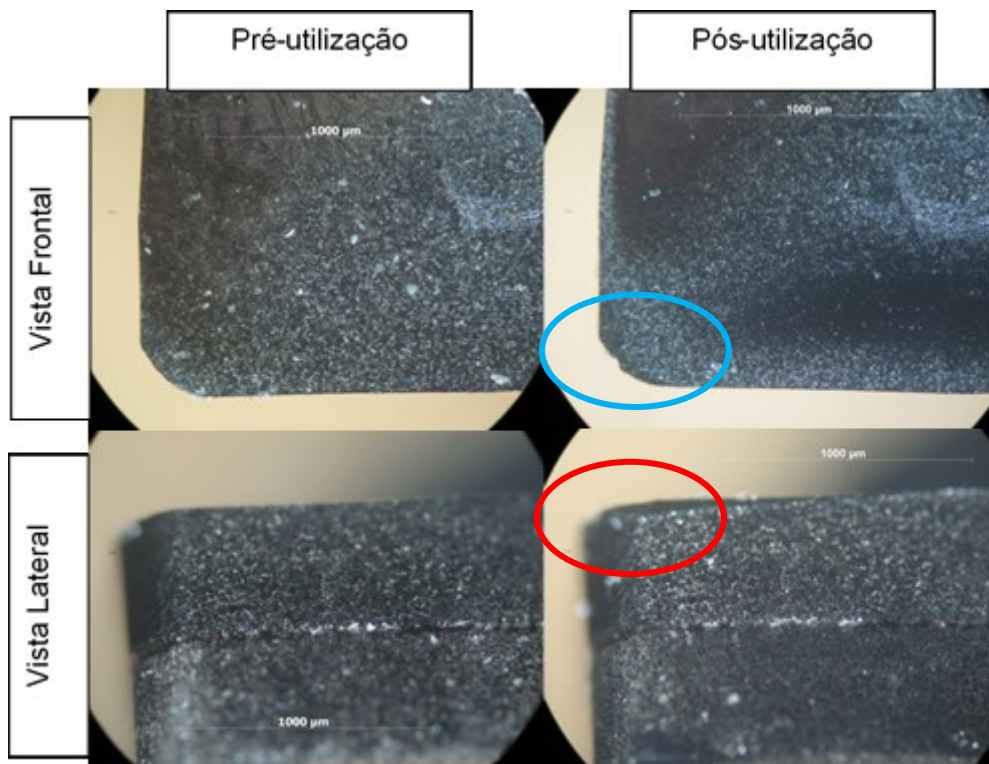


Figura 39 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 04 M 02

- Inseto nº 2

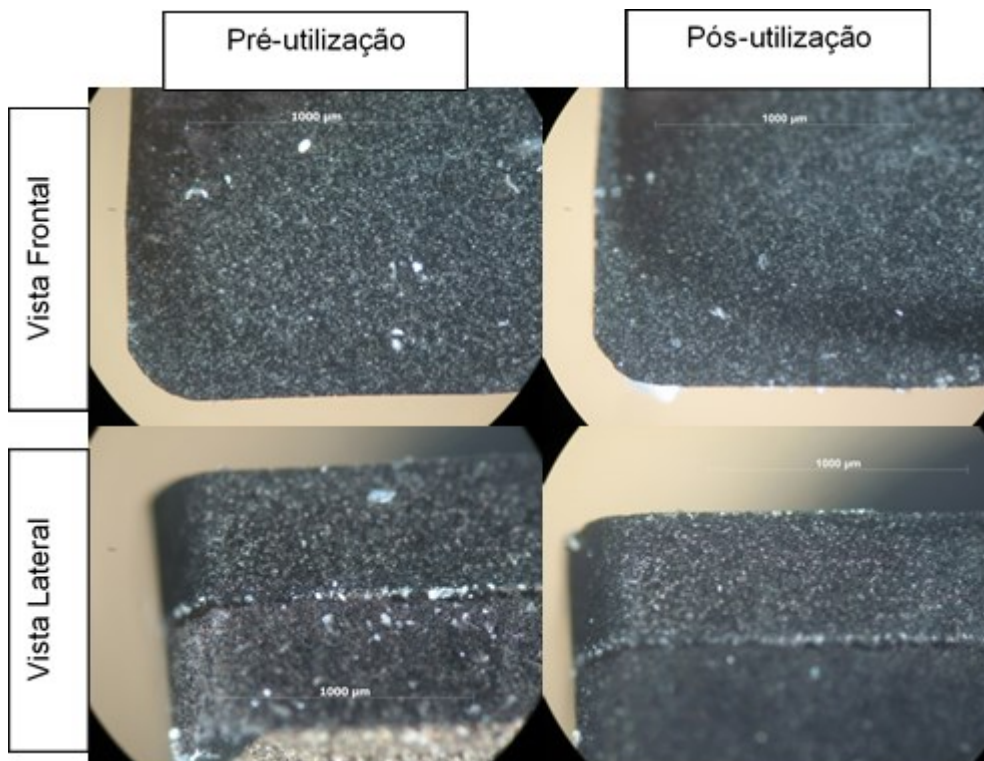


Figura 40 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 04 M 02

Através das imagens anteriores é possível verificar que esta ferramenta depois de estar a maquinar durante 2145min apresenta apenas uma pequena fratura, assinalada com um círculo a azul, e um ligeiro desgaste da face de saída, com círculo a vermelho, no inserto nº 1, representado na Figura 39.

### 3. Ferramenta 04 M 03

A ferramenta 04 M 03 contém insertos do tipo CTH 025 e deveria maquinar com os parâmetros apresentados na Tabela 10. No entanto, ocorreu um erro de maquinação não se obtendo qualquer tempo de trabalho.

Tabela 10 Parâmetros de maquinação da ferramenta 04 M 03

Dados da ferramenta				Tipo de PCD	Propriedades		
<b>Diâmetro</b>	4 mm	<b>Referência</b>		CTH	<b>Tolerância</b> ∅	<b>Sup./ Inf.</b>	00 µ / -20 µ
<b>Raio Canto</b>	0,3 mm	04 M 03					
<b>Diâmetro de corte</b>	<b>Z (nº cort)</b>	<b>Fz</b>	<b>Vc</b>	<b>Rotação</b>	<b>Avanço Linear</b>	<b>Tempo de trabalho</b>	
<b>mm</b>	Unidade	mm/dente	m/Min	RPM	mm/min	minutos	
<b>4</b>	2	0,065	150,8	12000	1560	-	

#### 4. Ferramenta 04 M 04

A ferramenta 04 M 04 contém insertos do tipo CTH 025 e esteve a maquinar com os parâmetros de maquinação presentes na Tabela 11 durante 1328 minutos.

Tabela 11 Parâmetros de maquinação da ferramenta 04 M 04

Dados da ferramenta				Tipo de PCD	Propriedades		
<b>Diâmetro</b>	4 mm	<b>Referência</b>		CTH	<b>Tolerância</b> $\varnothing$	<b>Sup./ Inf.</b>	00 $\mu$ / 00 $\mu$
<b>Raio Canto</b>	0,3 mm	04 M 04					
<b>Diâmetro de corte</b>	<b>Z (nº cort)</b>	<b>Fz</b>	<b>Vc</b>	<b>Rotação</b>	<b>Avanço Linear</b>	<b>Tempo de trabalho</b>	
<b>Mm</b>	Unidade	mm/dente	m/Min	RPM	mm/min	minutos	
<b>4,3</b>	2	0,09	150,8	11163	2009	1328	

Esta ferramenta continuou em operações de maquinação na empresa onde esteve em teste pelo que não foi possível obter as imagens do desgaste dos insertos.

#### 5. Ferramenta 04 M 05

A ferramenta 04 M 05 contém insertos do tipo CTB 010 e esteve a maquinar com os parâmetros de maquinação presentes na Tabela 12 durante 1216 minutos.

Tabela 12 Parâmetros de maquinação da ferramenta 04 M 05

Dados da ferramenta				Tipo de PCD	Propriedades		
<b>Diâmetro</b>	4 mm	<b>Referência</b>		CTB	<b>Tolerância</b> $\varnothing$	<b>Sup./ Inf.</b>	00 $\mu$ / 00 $\mu$
<b>Raio Canto</b>	0,3 mm	04 M 05					
<b>Diâmetro de corte</b>	<b>Z (nº cort)</b>	<b>Fz</b>	<b>Vc</b>	<b>Rotação</b>	<b>Avanço Linear</b>	<b>Tempo de trabalho</b>	
<b>Mm</b>	Unidade	mm/dente	m/Min	RPM	mm/min	minutos	
<b>4,3</b>	2	0,065	150,8	11163	1451	1216	

De seguida podemos observar o desgaste dos dois insertos desta ferramenta:

- Inseto nº 1

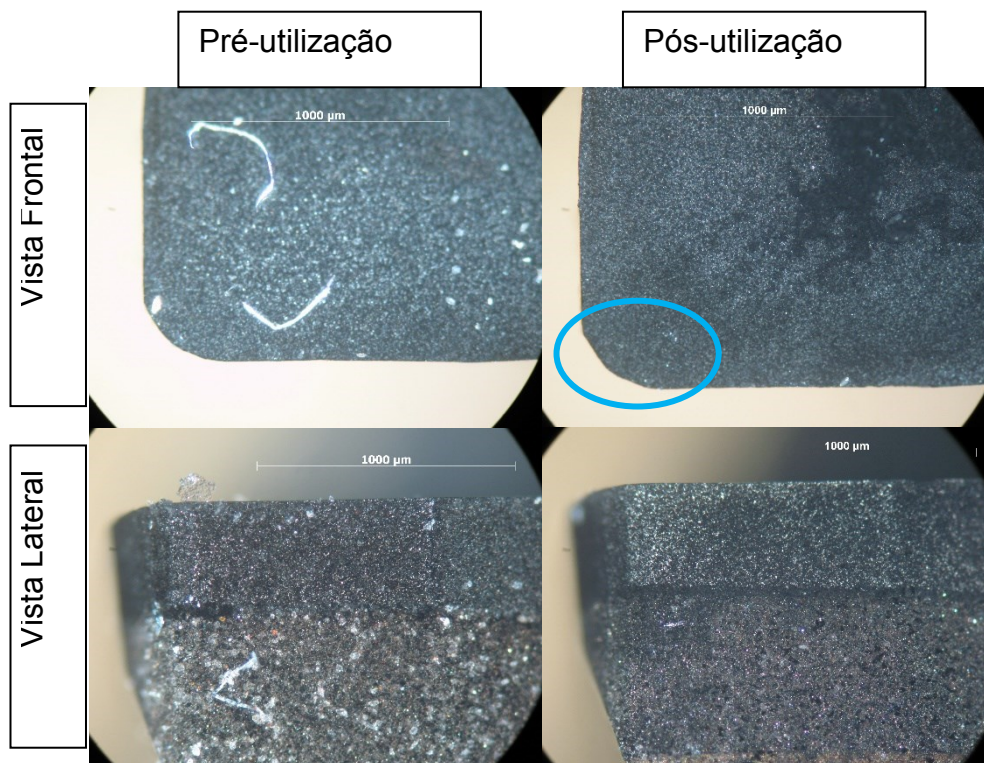


Figura 41 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 04 M 05

- Inseto nº 2

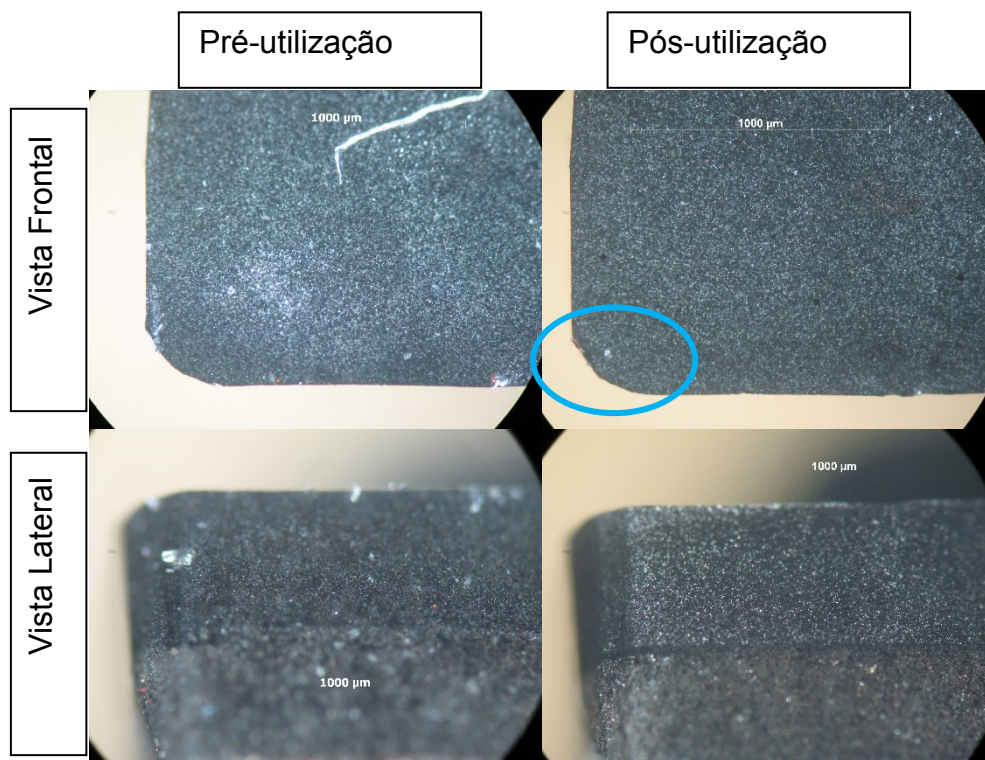


Figura 42 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 04 M 05

Através das imagens anteriores é possível verificar que esta ferramenta apresenta apenas pequenas fraturas identificadas com um círculo a azul, não sendo notório o desgaste na face de saída nem de ataque.

## 6. Ferramenta 04 M 06

A ferramenta 04 M 06 contém insertos do tipo CTB 010 e esteve a maquinar com os parâmetros de maquinação presentes na Tabela 13 durante 1410 minutos.

Tabela 13 Parâmetros de maquinação da ferramenta 04 M 06

Dados da ferramenta			Tipo de PCD	Propriedades			
<b>Diâmetro</b>	4 mm	<b>Referência</b>	CTB	<b>Tolerância a <math>\varnothing</math></b>	<b>Sup./ Inf.</b>	00 $\mu$ / 00 $\mu$	
<b>Raio Canto</b>	0,3 mm	04 M 06					
<b>Diâmetro de corte</b>	<b>Z (nº cort)</b>	<b>Fz</b>	<b>Vc</b>	<b>Rotação</b>	<b>Avanço Linear</b>	<b>Tempo de trabalho</b>	
<b>Mm</b>	Unidade	mm/dente	m/Min	RPM	mm/min	minutos	
<b>4,3</b>	2	0,09	150,8	11163	2009	1410	

De seguida podemos observar o desgaste dos dois insertos desta ferramenta:

- Inseto nº 1

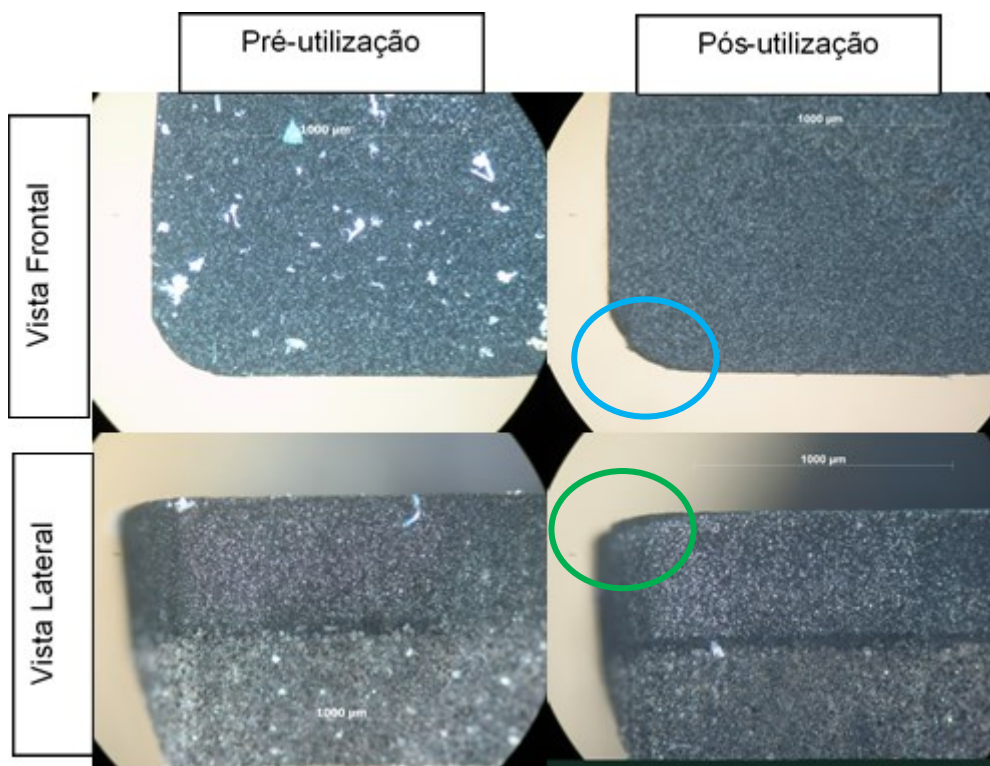


Figura 43 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 04 M 06

- Inseto nº 2

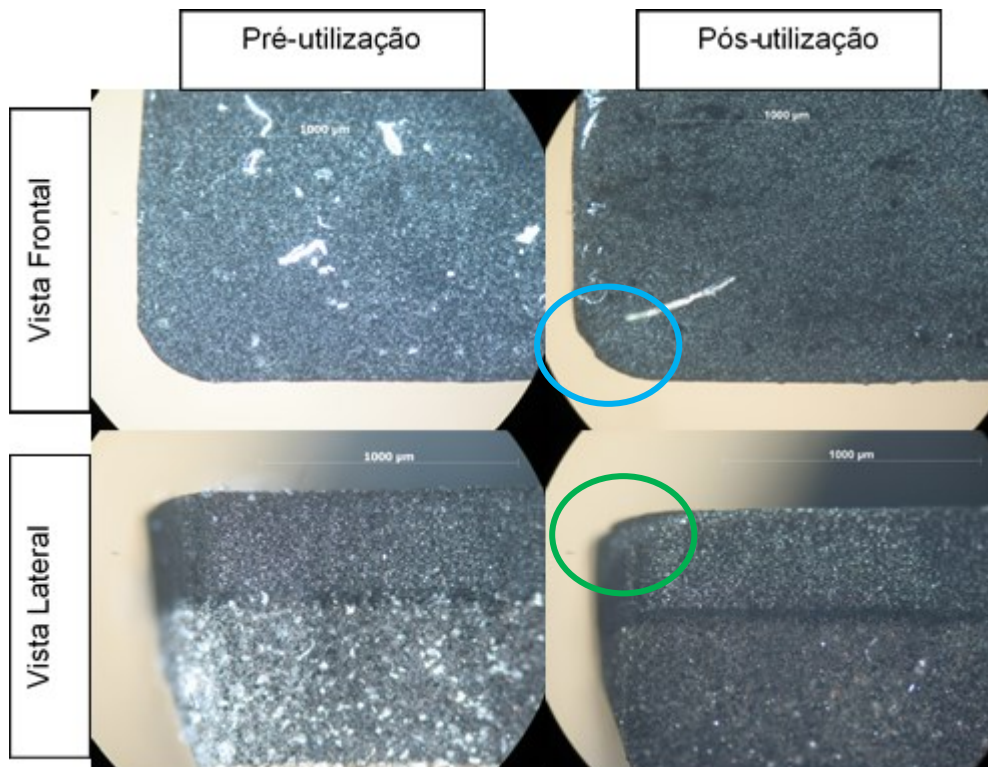


Figura 44 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 04 M 06

Através das imagens anteriores é possível verificar que esta ferramenta 04M06 apresenta algumas fraturas, identificadas com círculo a azul, e deformação plástica, círculo a verde, não sendo notório o desgaste na face de saída nem de ataque.

## 7. Ferramenta 04 M 07

A ferramenta 04 M 07 contém insertos do tipo CTB 010 e deveria maquinar com os parâmetros apresentados na Tabela 14, no entanto ficou inapta para maquinação não se obtendo qualquer tempo de trabalho. Esta ferramenta teve um erro de produção por parte da empresa Araújo & Silva.

Tabela 14 Parâmetros de maquinação da ferramenta 04 M 07

Dados da ferramenta				Tipo de PCD	Propriedades		
<b>Diâmetro</b>	4 mm	<b>Referência</b>		CTB	<b>Tolerância a <math>\phi</math></b>	<b>Sup./ Inf.</b>	00 $\mu$ / 00 $\mu$
<b>Raio Canto</b>	0,3 mm	04 M 07					
<b>Diâmetro de corte</b>	<b>Z (nº cort)</b>	<b>Fz</b>	<b>Vc</b>	<b>Rotação</b>	<b>Avanço Linear</b>	<b>Tempo de trabalho</b>	
<b>Mm</b>	Unidade	mm/dente	m/Min	RPM	mm/min	minutos	
<b>4,3</b>	2	0,105	94,56	7000	1470	-	

## 8. Ferramenta 04 M 08

A ferramenta 04 M 08 contém insertos do tipo CTB 010 e esteve a maquinar com os parâmetros de maquinação presentes na Tabela 15 durante 840 minutos.

Tabela 15 Parâmetros de maquinação da ferramenta 04 M 08

Dados da ferramenta				Tipo de PCD	Propriedades		
<b>Diâmetro</b>	4 mm	<b>Referência</b>		CTB	<b>Tolerância a <math>\varnothing</math></b>	<b>Sup./ Inf.</b>	00 $\mu$ / 00 $\mu$
<b>Raio Canto</b>	0,3 mm	04 M 08					
<b>Diâmetro de corte</b>	<b>Z (nº cort)</b>	<b>Fz</b>	<b>Vc</b>	<b>Rotação</b>	<b>Avanço Linear</b>	<b>Tempo de trabalho</b>	
<b>Mm</b>	Unidade	mm/dente	m/Min	RPM	mm/min	minutos	
<b>4,3</b>	2	0,145	94,56	7000	2030	840	

De seguida podemos observar o desgaste de dois insertos desta ferramenta:

- Inseto nº 1

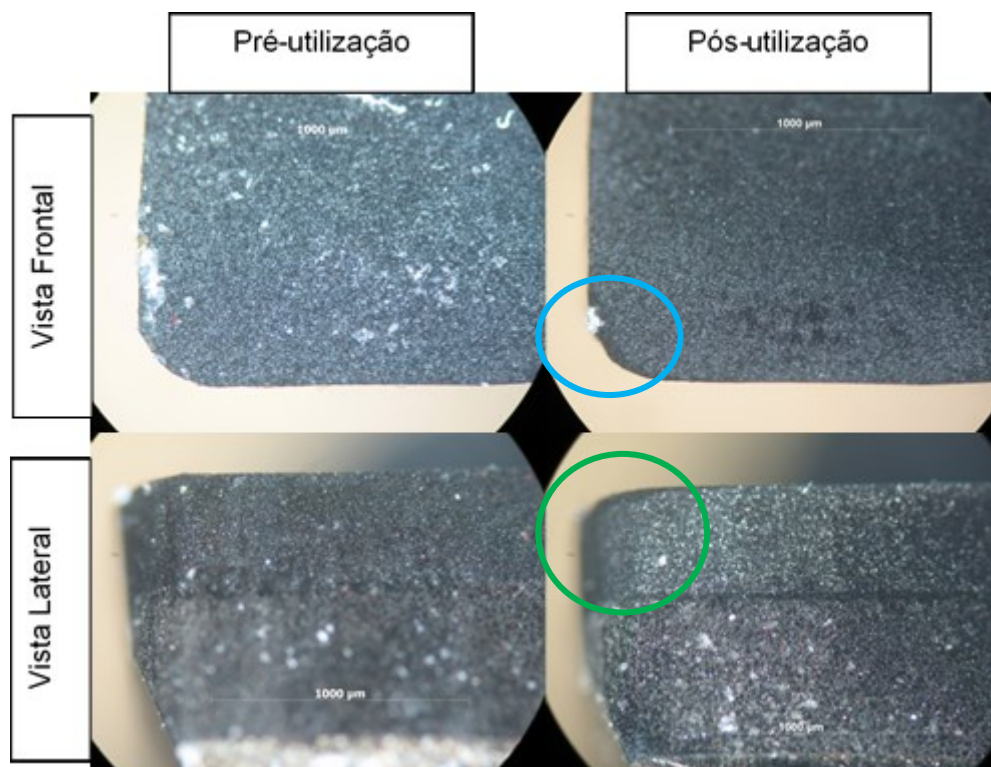


Figura 45 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 04 M 08

- Inserto nº 2

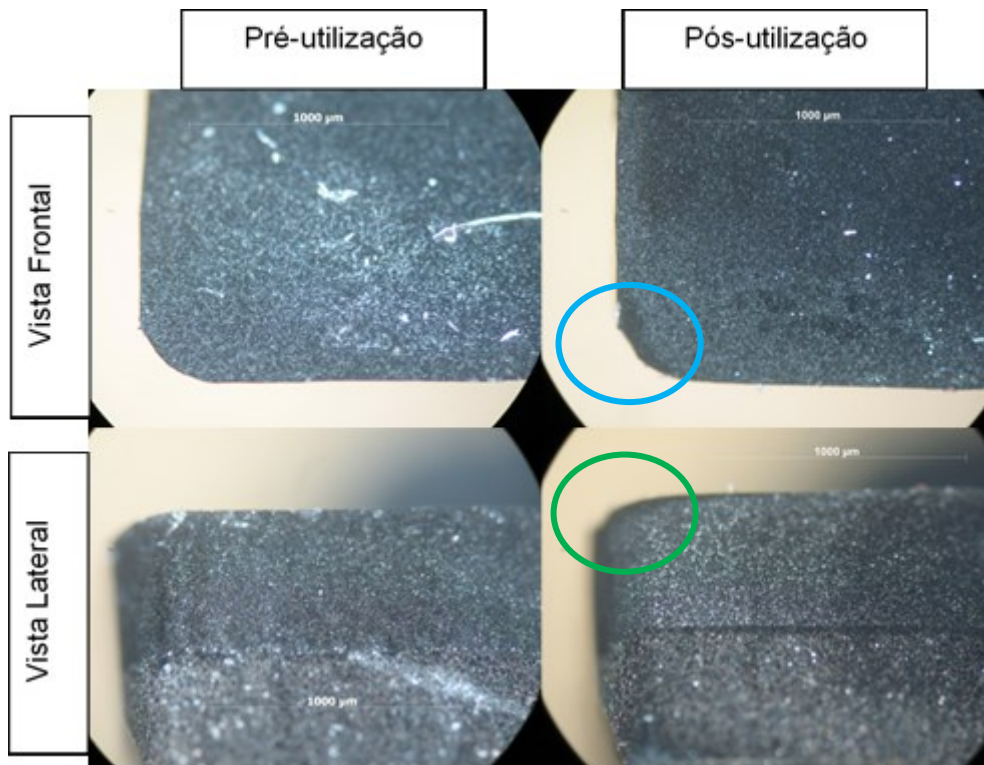


Figura 46 Desgaste o inserto nº 2 da ferramenta 04 M 08

Através das imagens em cima podemos verificar que a ferramenta 04M08 apresenta algumas fraturas, circulo a azul, e alguma deformação plástica, círculo a verde. Devido a esta ferramenta ter estado a maquinar apenas 840 minutos, é provável que os parâmetros utilizados não tenham sido os melhores ou outros fatores tais como a refrigeração utilizada não tenham sido os mais adequados para esta maquinação.

## 9. Ferramenta 12 M 01

A ferramenta 12 M 01 contém insertos do tipo CTH 025 e esteve a maquinar com os parâmetros de maquinação presentes na Tabela 16 durante 3372 minutos.

Tabela 16 Parâmetros de maquinação da ferramenta 12 M 01

Dados da ferramenta				Tipo de PCD	Propriedades		
Diâmetro	12 mm	Referência		CTH	Tolerância $\varnothing$	Sup./ Inf.	20 $\mu$ / 00 $\mu$
Raio Canto	0,5 mm	12 M 01					
Diâmetro de corte		Z (nº cort)	Fz	Vc	Rotação	Avanço Linear	Tempo de trabalho
Mm		Unidade	mm/dente	m/Min	RPM	mm/min	minutos
12		2	0,4	94,56	2508	2007	3372

De seguida podemos observar o desgaste dos dois insertos desta ferramenta:

- Inserto nº1

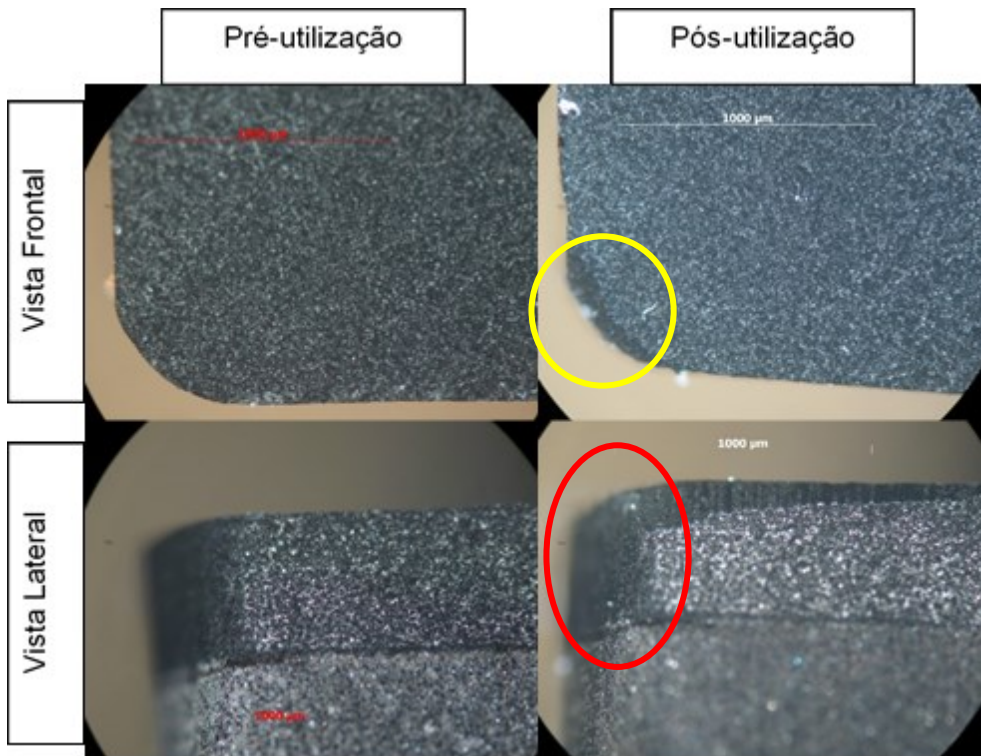


Figura 47 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 12 M 01

- Inserto nº 2

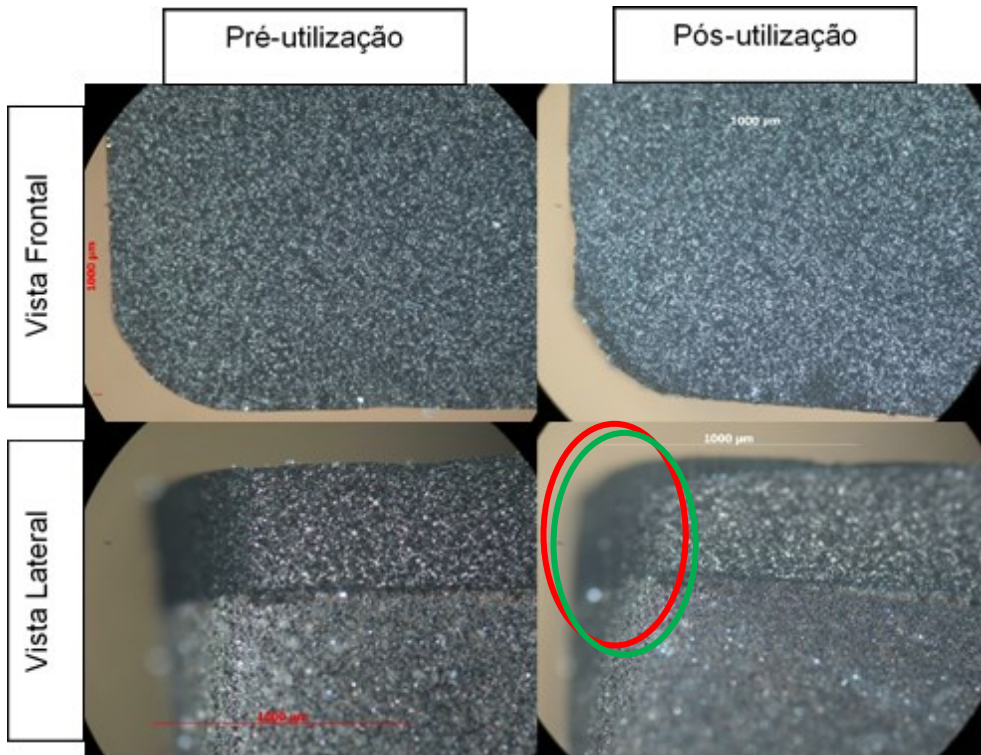


Figura 48 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 12 M 01

Através das imagens anteriores é possível verificar que esta ferramenta sofreu alguns tipos avarias/desgastes falados anteriormente como deformação plástica, círculo a verde, desgaste da face de ataque, círculo a amarelo e desgaste da face de saída, círculo a vermelho. Esta ferramenta deveria ter maquinado com velocidades de corte e avanço inferiores (pois um avanço de 0,5mm pode ser demasiado elevado e estar a aumentar as avarias/desgastes da ferramenta) e deveria ter havido uma melhor refrigeração e ter maquinado numa classe mais resistente ao desgaste/calor. O desgaste da face de ataque não tem uma cratera, mas apresenta um desgaste uniforme.

### 10. Ferramenta 12 M 02

A ferramenta 12 M 02 contém insertos do tipo CTH 025 e esteve a maquinar com os parâmetros de maquinação presentes na Tabela 17 durante 3336 minutos.

*Tabela 17 Parâmetros de maquinação da ferramenta 12 M 02*

Dados da ferramenta				Tipo de PCD	Propriedades		
Diâmetro	12 mm	Referência		CTH	Tolerância $\varnothing$	Sup./ Inf.	20 $\mu$ / 00 $\mu$
Raio Canto	0,5 mm	12 M 02					
Diâmetro de corte		Z (nº cort)	Fz	Vc	Rotação	Avanço Linear	Tempo de trabalho
Mm		Unidade	mm/dente	m/Min	RPM	mm/min	minutos
12		2	0,3	94,56	2508	1505	3336

De seguida podemos observar o desgaste das duas pastilhas desta ferramenta:

- Inseto nº 1

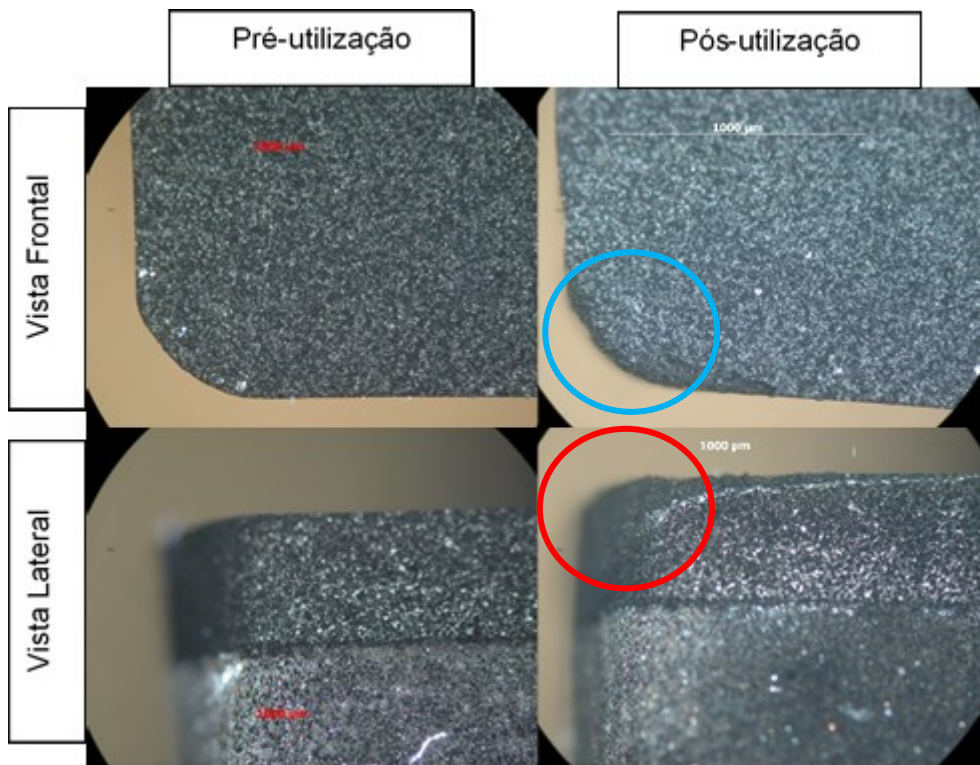


Figura 49 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 12 M 02

- Inseto nº 2

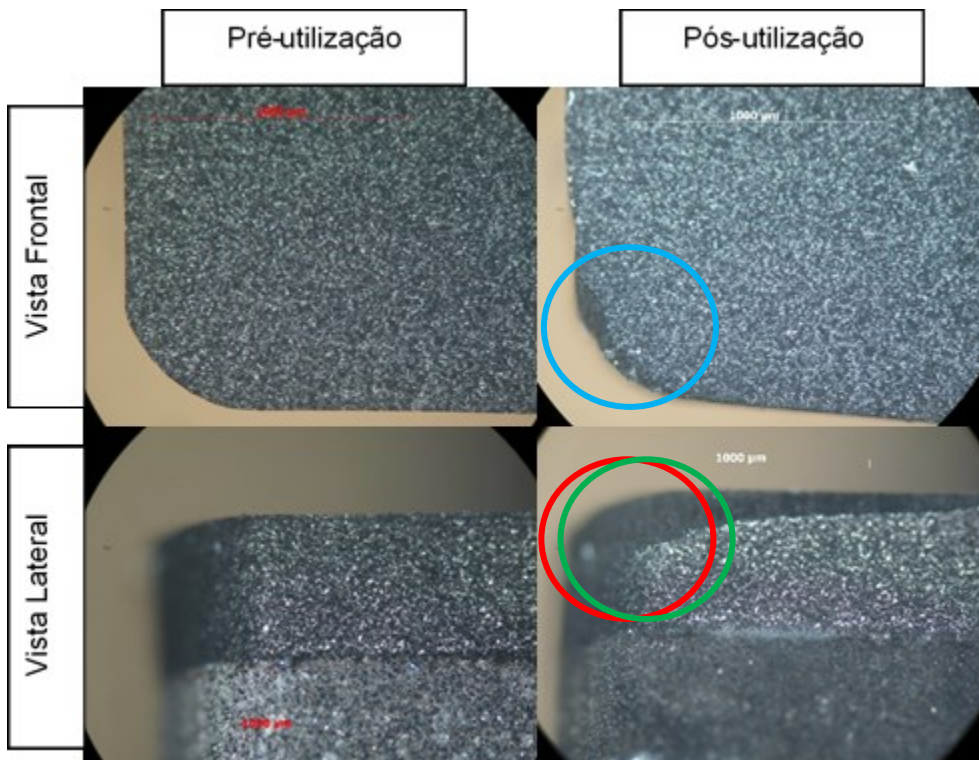


Figura 50 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 12 M 02

Dos tipos de desgaste/avarias referidos anteriormente, na ferramenta 12M02, podemos destacar deformação plástica, círculo a verde, desgaste na face de saída, círculo a vermelho, e ainda apresenta algumas fraturas, círculo a azul, uma vez que o ap é de 0,5 mm, sendo que é um valor muito elevado, o que pode ter contribuído para as fraturas. Os desgastes/avarias apresentados estão relacionados com alguns parâmetros de maquinação, como a velocidade de corte e o avanço, que poderão ser muito elevados, mas também com outros fatores, como a deficiente refrigeração, que podem ser otimizados.

### 11. Ferramenta 12 M 03

A ferramenta 12 M 03 contém insertos do tipo CTH 025 e esteve a maquinar com os parâmetros de maquinação presentes na Tabela 18 durante 3030 minutos.

*Tabela 18 Parâmetros de maquinação da ferramenta 12 M 03*

Dados da ferramenta				Tipo de PCD	Propriedades		
Diâmetro	12 mm	Referência		CTH	Tolerância $\varnothing$	Sup./ Inf.	20 $\mu$ / 00 $\mu$
Raio Canto	0,5 mm	12 M 03					
Diâmetro de corte		Z (nº cort)	Fz	Vc	Rotação	Avanço Linear	Tempo de trabalho
Mm		Unidade	mm/dente	m/Min	RPM	mm/min	minutos
12		2	0,25	150,8	4000	2000	3030

De seguida podemos observar o desgaste dos dois insertos desta ferramenta:

- Inserto nº 1

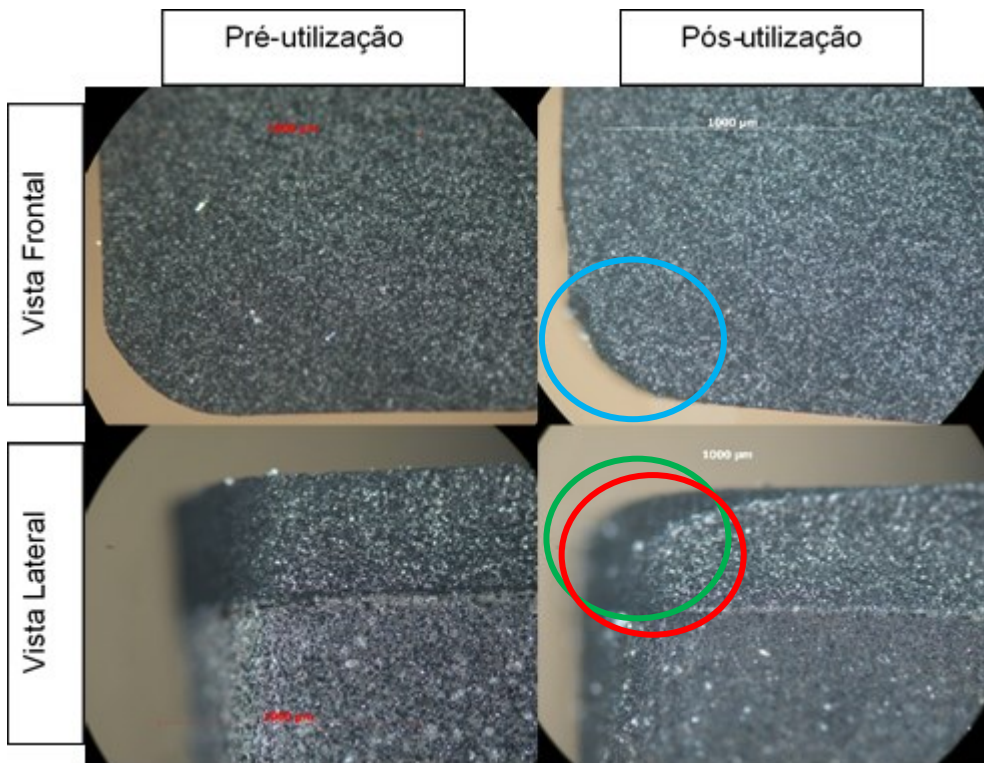


Figura 51 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 12 M 03

- Inserto nº 2

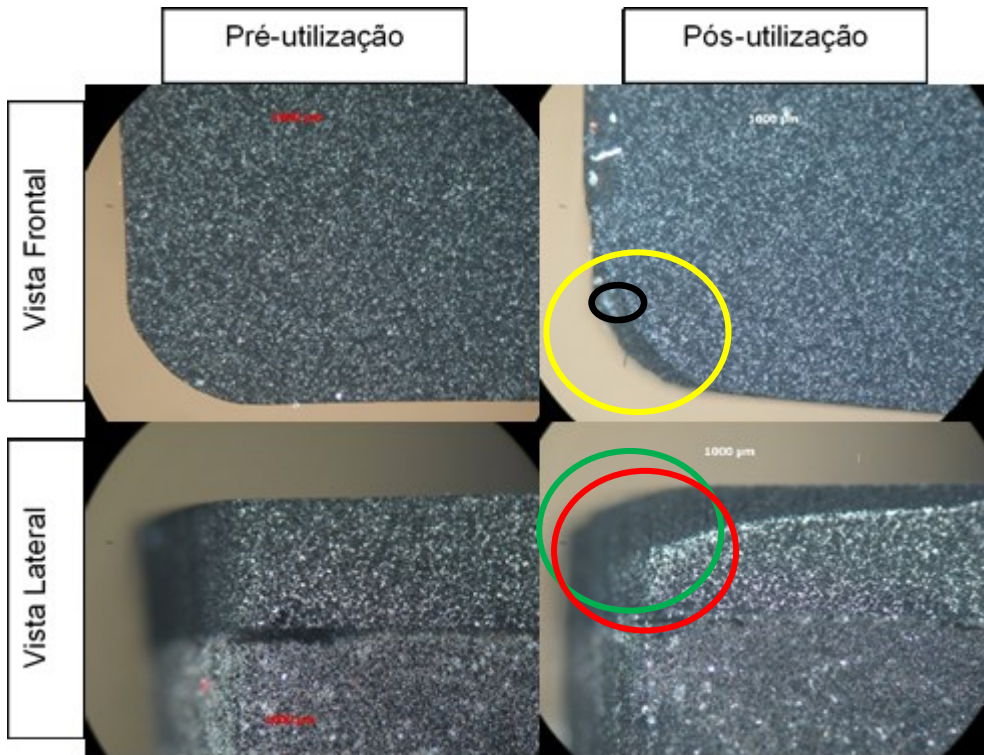


Figura 52 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 12 M 03

Através das imagens anteriores é possível verificar que esta ferramenta sofreu alguns tipos avarias/desgastes falados anteriormente como deformação plástica, círculo a verde, um eventual desgaste da face de ataque com cratera, círculo a amarelo e o círculo a preto representa a eventual cratera, desgaste da face de saída, círculo a vermelho e fraturas, círculo azul. Esta ferramenta deveria ter maquinado com velocidades de corte inferiores, pois com uma velocidade de corte de 150,8m/min pode ter gerado mais avarias/desgastes na ferramenta, deveria ter havido uma melhor refrigeração e deveria ter maquinado numa classe mais resistente ao desgaste/calor.

## 12. Ferramenta 12 M 04

A ferramenta 12 M 04 contém insertos do tipo CTB 010 e esteve a maquinar com os parâmetros de maquinação presentes na Tabela 19 durante 648 minutos. Esta ferramenta maquinou apenas durante este tempo por ter ocorrido um problema na maquinação, nomeadamente esta ferramenta maquinou algo mais que grafite pois maquinou latão do suporte e aço do parafuso de fixação, deste modo a ferramenta ficou inapta para maquinação antes do tempo pretendido.

Tabela 19 Parâmetros de maquinação da ferramenta 12 M 04

Dados da ferramenta			Tipo de PCD	Propriedades			
Diâmetro	12 mm	Referência		CTB	Tolerância $\varnothing$	Sup./ Inf.	00 $\mu$ / -10 $\mu$
Raio Canto	0,5 mm	12 M 04					
Diâmetro de corte		Z (nº cort)	Fz	Vc	Rotação	Avanço Linear	Tempo de trabalho
Mm		Unidade	mm/dente	m/Min	RPM	mm/min	minutos
12		2	0,19	150,8	4000	1520	648

De seguida podemos observar o desgaste dos dois insertos desta ferramenta:

- Inseto nº 1

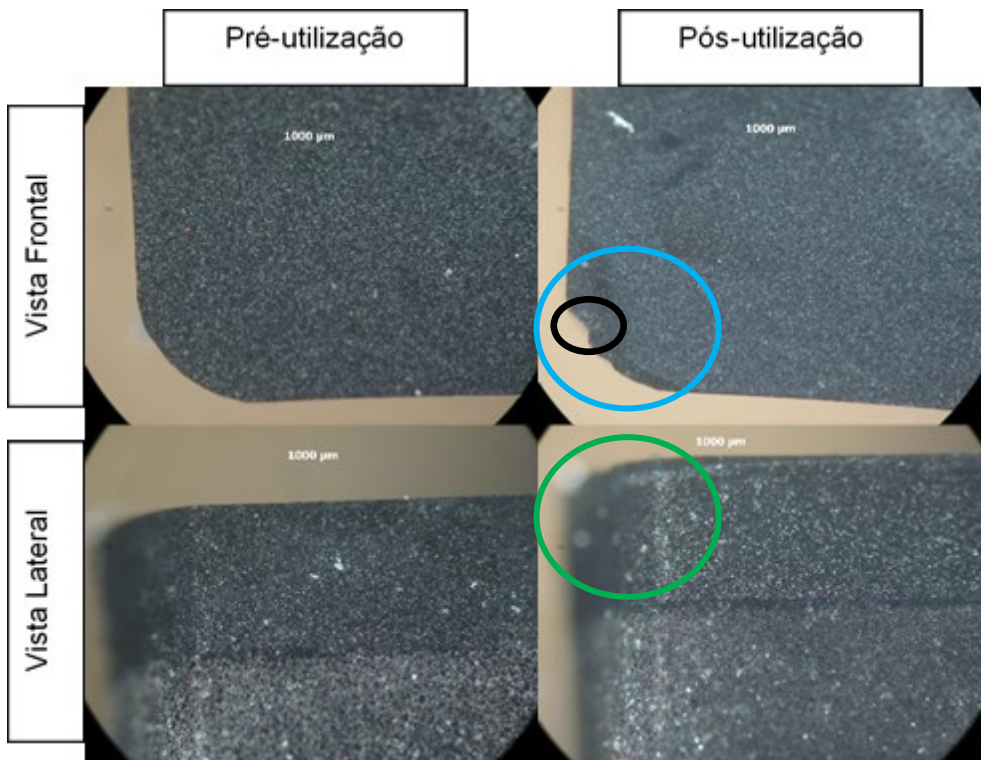


Figura 53 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 12 M 04

- Inseto nº 2

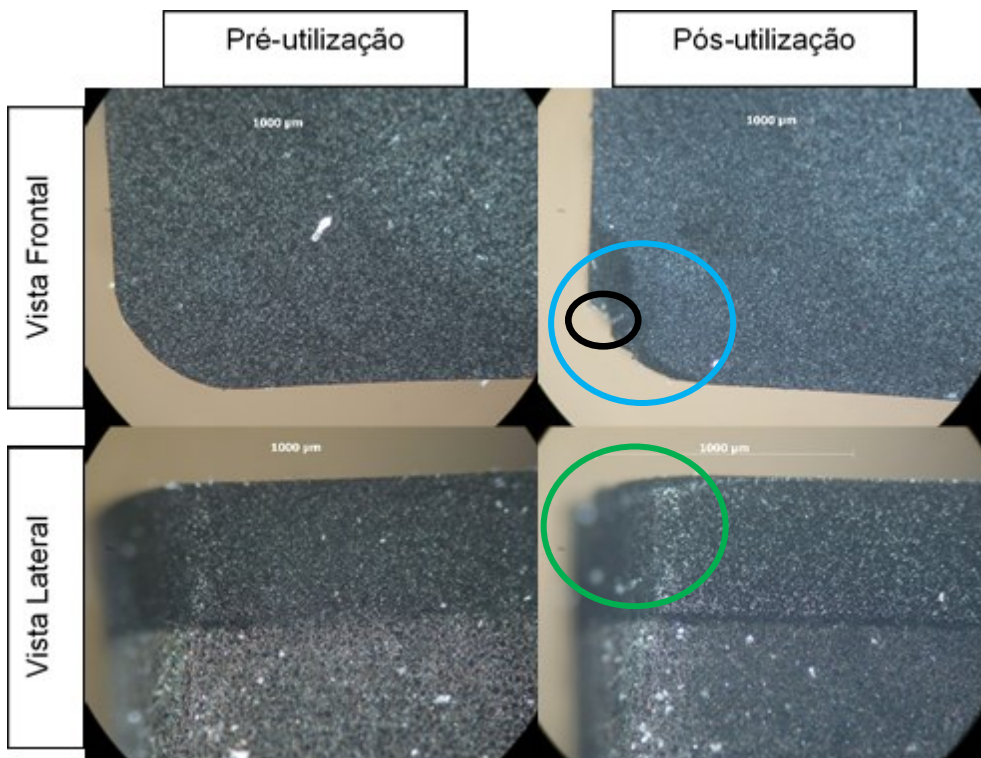


Figura 54 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 12 M 04

Esta ferramenta apresenta, eventuais crateras que deram origem a fraturas, círculo a preto representa a cratera e círculo a azul as fraturas e deformação plástica, círculo a verde. Para evitar estes defeitos apresentados era importante rever o avanço com que esta ferramenta teve a maquinar, pois um avanço de 0,5mm pode ser demasiado elevado e originar mais avarias/desgaste na ferramenta como as crateras e as fraturas.

### 13. Ferramenta 12 M 05

A ferramenta 12 M 05 contém insertos do tipo CTB 010 e esteve a maquinar com os parâmetros de maquinação presentes na Tabela 20 durante 1420 minutos.

Tabela 20 Parâmetros de maquinação da ferramenta 12 M 05

Dados da ferramenta			Tipo de PCD	Propriedades			
Diâmetro	12 mm	Referência	CTB	Tolerância $\varnothing$	Sup./ Inf.	00 $\mu$ / 00 $\mu$	
Raio Canto	0,5 mm						
Diâmetro de corte		Z (nº cort)	Fz	Vc	Rotação	Avanço Linear	Tempo de trabalho
Mm		Unidade	mm/dente	m/Min	RPM	mm/min	minutos
12		2	0,25	150,8	4000	2000	1420

De seguida podemos observar o desgaste dos dois insertos desta ferramenta:

- Inseto nº 1

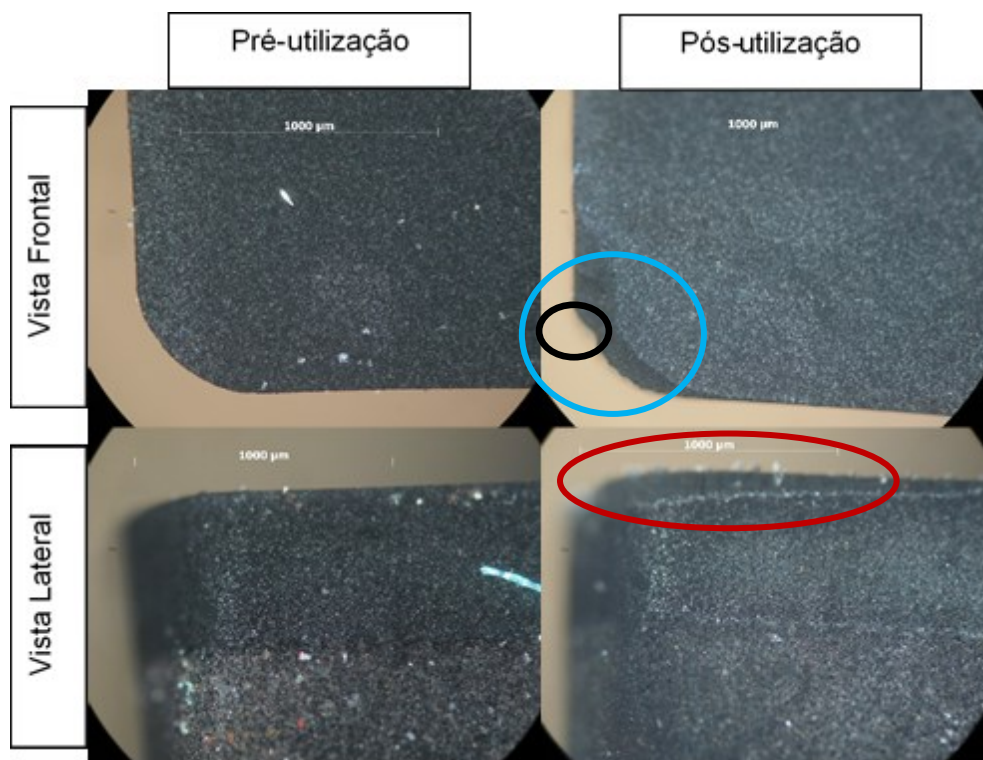


Figura 55 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 12 M 05

- Inserto nº 2

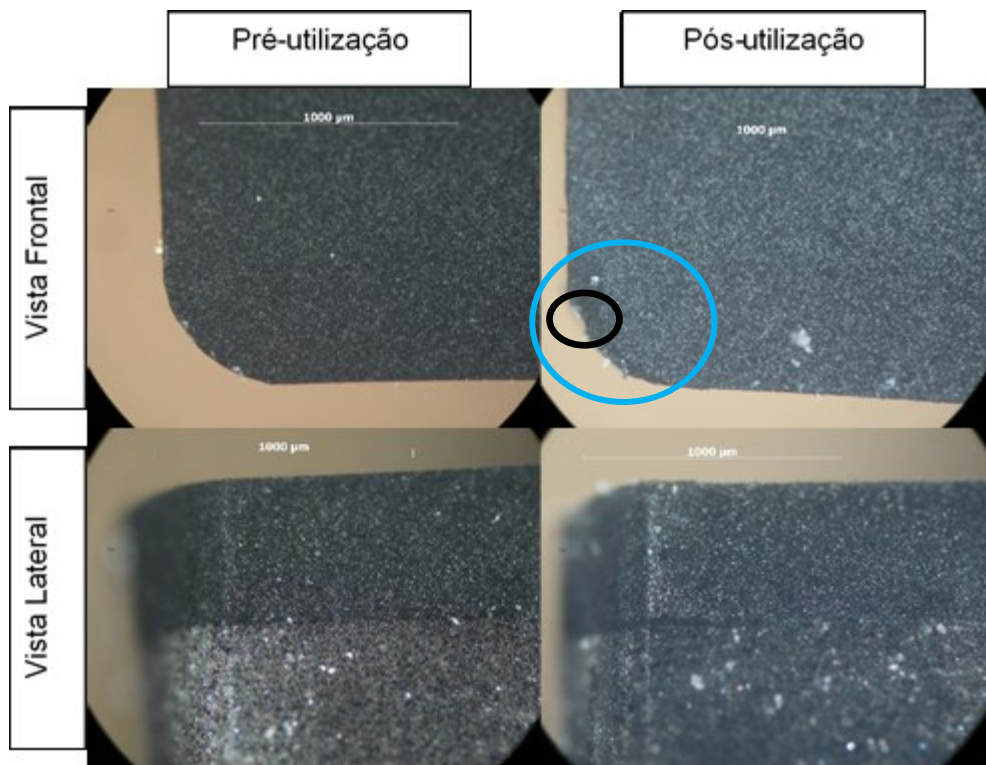


Figura 56 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 12 M 05

Através das imagens anteriores é possível verificar que a ferramenta 12M05 apresenta eventuais crateras que deram origem a fraturas, círculo a preto representa as crateras e círculo a azul as fraturas e desgaste da face de saída essencialmente no inserto nº1, círculo a vermelho. Para esta ferramenta seria aconselhável verificar alguns parâmetros de corte como a velocidade e o avanço, pois foram utilizados valores elevados nestes parâmetros que podem ter dado origem as avarias/desgastes verificados.

#### 14. Ferramenta 12 M 06

A ferramenta 12 M 06 contém insertos do tipo CTH 025 e esteve a maquinar com os parâmetros de maquinação presentes na Tabela 21 durante 2520 minutos.

Tabela 21 Parâmetros de maquinação da ferramenta 12 M 06

Dados da ferramenta				Tipo de PCD	Propriedades		
Diâmetro	12 mm	Referência		CTH	Tolerância $\varnothing$	Sup./ Inf.	20 $\mu$ / 00 $\mu$
Raio Canto	0,5 mm	12 M 06					
Diâmetro de corte	Z (nº cort)	Fz	Vc	Rotação	Avanço Linear	Tempo de trabalho	
Mm	Unidade	mm/dente	m/Min	RPM	mm/min	Minutos	
12	2	0,19	150,8	4000	1520	2520	

Esta ferramenta contínua em operações de maquinação na empresa onde esteve em teste pelo que não foi possível tirar as imagens do desgaste das pastilhas.

### 15. Ferramenta 12 M 07

A ferramenta 12 M 07 contém insertos do tipo CTB 010 e esteve a maquinar com os parâmetros de maquinação presentes na Tabela 22 durante 2791 minutos.

Tabela 22 Parâmetros de maquinação da ferramenta 12 M 07

Dados da ferramenta				Tipo de PCD	Propriedades		
Diâmetro	12 mm	Referência		CTB	Tolerância $\varnothing$	Sup./ Inf.	00 $\mu$ / 00 $\mu$
Raio Canto	0,5 mm	12 M 07					
Diâmetro de corte		Z (nº cort)	Fz	Vc	Rotação	Avanço Linear	Tempo de trabalho
Mm		Unidade	mm/dente	m/Min	RPM	mm/min	minutos
12		2	0,4	94,56	2508	2007	2791

De seguida podemos observar o desgaste dos dois insertos desta ferramenta:

- Inseto nº 1

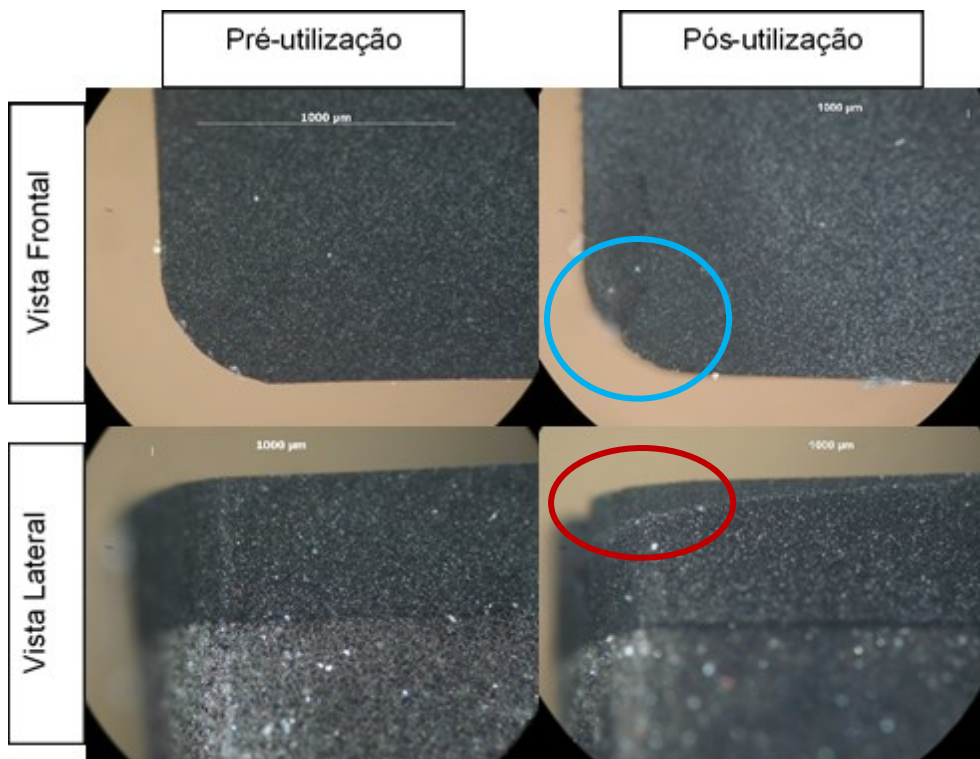


Figura 57 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 12 M 07

- Inserto nº 2

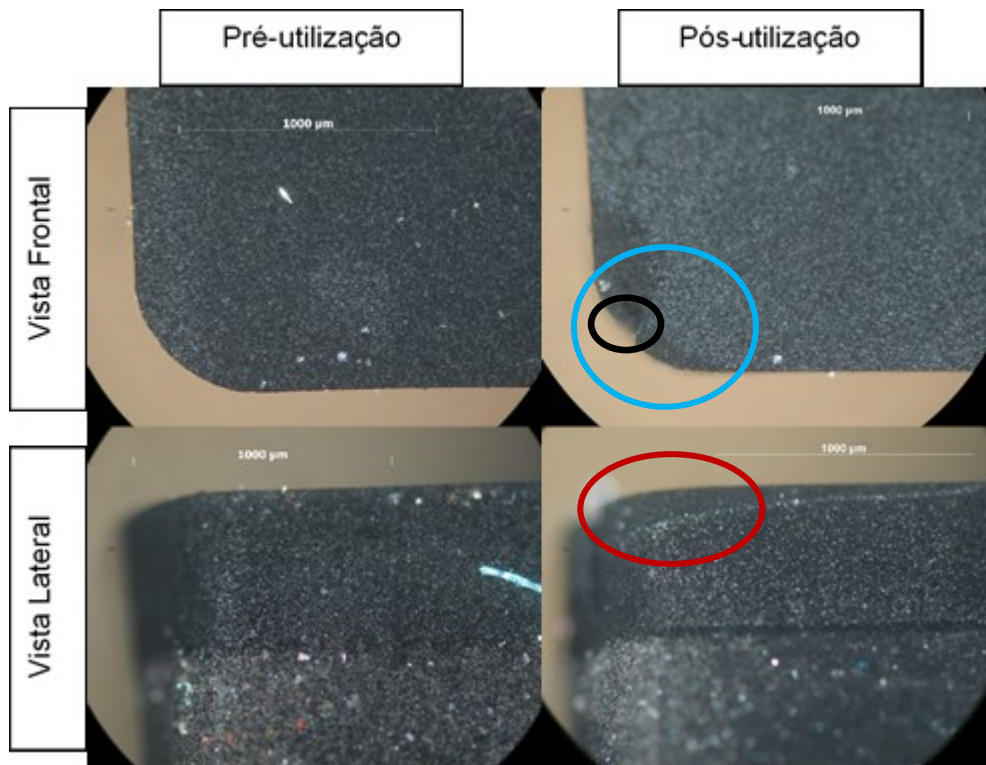


Figura 58 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 12 M 07

Através das imagens anteriores é possível verificar que a ferramenta 12M07 apresenta algumas fraturas, provavelmente originadas por crateras, o círculo a azul representa as fraturas e o círculo a preto a cratera e desgaste da face de saída, círculo a vermelho. Para esta ferramenta seria aconselhável verificar alguns parâmetros de corte como a velocidade e o avanço.

## 16. Ferramenta 12 M 08

A ferramenta 12 M 08 contém insertos do tipo CTB 010 e esteve a maquinar com os parâmetros de maquinação presentes na Tabela 23 durante 3307 minutos.

Tabela 23 Parâmetros de maquinação da ferramenta 12 M 08

Dados da ferramenta				Tipo de PCD	Propriedades		
Diâmetro	12 mm	Referência		CTB	Tolerância $\varnothing$	Sup./ Inf.	00 $\mu$ / -10 $\mu$
Raio Canto	0,5 mm	12 M 08					
Diâmetro de corte		Z (nº cort)	Fz	Vc	Rotação	Avanço Linear	Tempo de trabalho
Mm		Unidade	mm/dente	m/Min	RPM	mm/min	minutos
12		2	0,3	94,56	2508	1505	3307

Esta ferramenta continua em operações de maquinação na empresa onde esteve em teste pelo que não foi possível tirar as imagens do desgaste dos insertos.

### 17. Ferramenta 8 M 01

A ferramenta 8 M 01 contém insertos do tipo CTM 302 e esteve a maquinar com os parâmetros de maquinação presentes na Tabela 24 durante 1516 minutos.

Tabela 24 Parâmetros de maquinação da ferramenta 8 M 01

Dados da ferramenta				Tipo de PCD	Propriedades		
Diâmetro	8 mm	Referência		CTM	Tolerância $\varnothing$	Sup./ Inf.	10 $\mu$ / 00 $\mu$
Raio Canto	0,3 mm	8 M 01					
Diâmetro de corte	Z (nº cort)	Fz	Vc	Rotação	Avanço Linear	Tempo de trabalho	
Mm	Unidade	mm/dente	m/Min	RPM	mm/min	minutos	
8	2	0,175	125,66	5000	1750	1516	

De seguida podemos observar o desgaste dos dois insertos desta ferramenta:

- Inseto nº 1

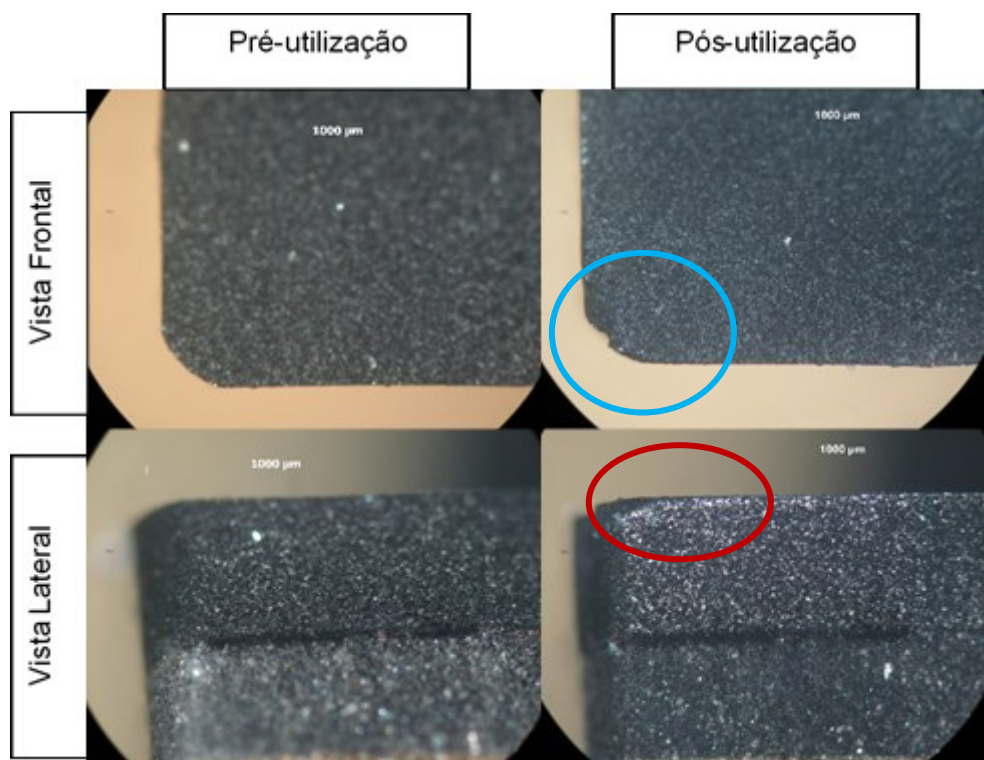


Figura 59 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 8 M 01

- Inseto nº 2

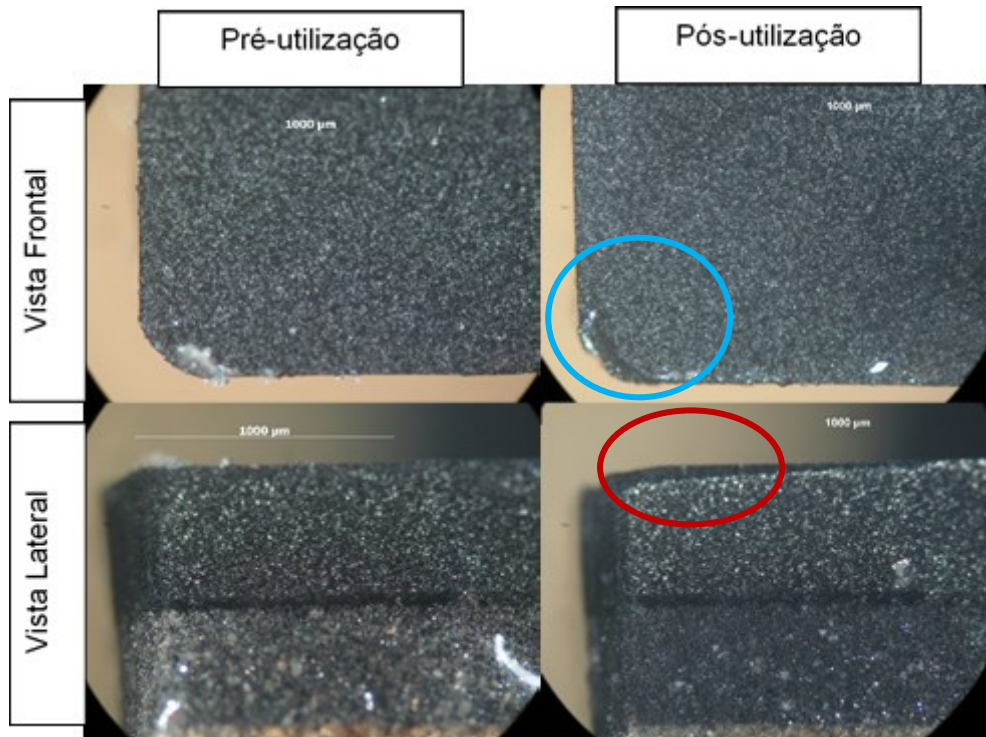


Figura 60 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 8 M 01

A ferramenta 8M01 depois do processo de maquinação apresenta alguns defeitos como fraturas, círculo a azul e pouco desgaste da face de saída, círculo a vermelho. Esta ferramenta deveria ter maquinado com velocidades de corte inferiores, pois o valor utilizado pode ter contribuído para as avarias/desgastes verificados e além disso fatores como a refrigeração deveriam ter sido melhorados.

### 18. Ferramenta 8 M 02

A ferramenta 8 M 02 contém insertos do tipo CTM 302 e esteve a maquinar com os parâmetros de maquinação presentes na Tabela 25 durante 728 minutos.

Tabela 25 Parâmetros de maquinação da ferramenta 8 M 02

Dados da ferramenta				Tipo de PCD	Propriedades		
<b>Diâmetro</b>	8 mm	<b>Referência</b>		CTM	<b>Tolerância</b> Ø	<b>Sup./ Inf.</b>	10 µ / 00 µ
<b>Raio Canto</b>	0,3 mm	8 M 02					
<b>Diâmetro de corte</b>	<b>Z (nº cort)</b>	<b>Fz</b>	<b>Vc</b>	<b>Rotação</b>	<b>Avanço Linear</b>	<b>Tempo de trabalho</b>	
<b>Mm</b>	Unidade	mm/dente	m/Min	RPM	mm/min	minutos	
<b>8</b>	2	0,175	125,66	5000	1750	728	

De seguida podemos observar o desgaste de dois insertos desta ferramenta:

- Inseto nº 1

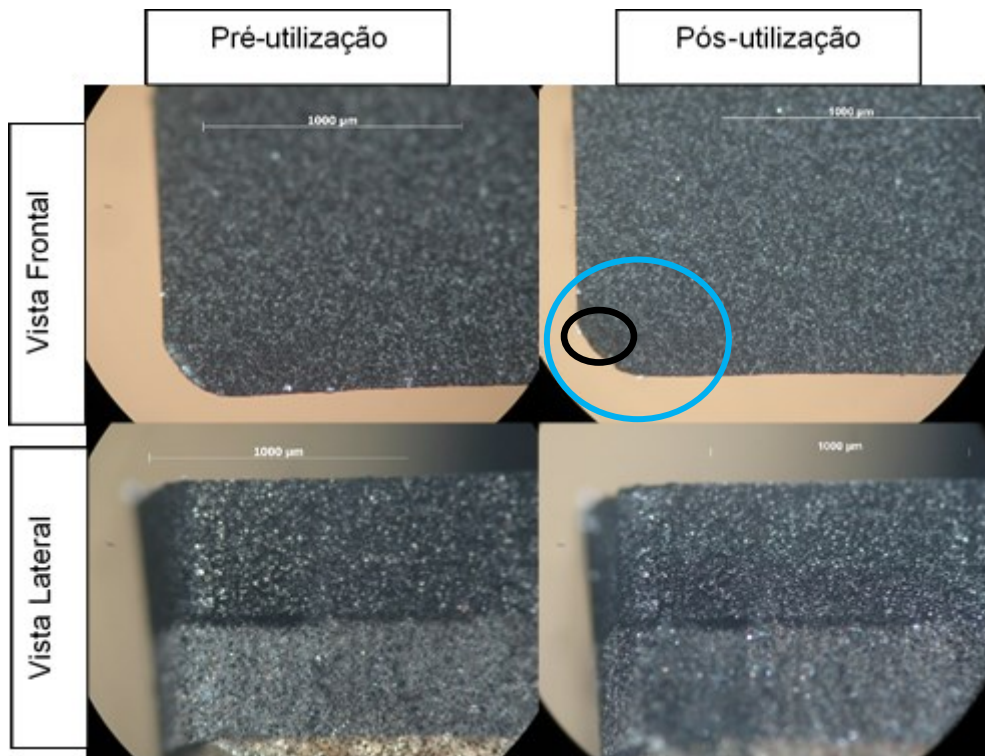


Figura 61 Desgaste do inserto nº 1 da ferramenta 8 M 02

- Inseto nº 2

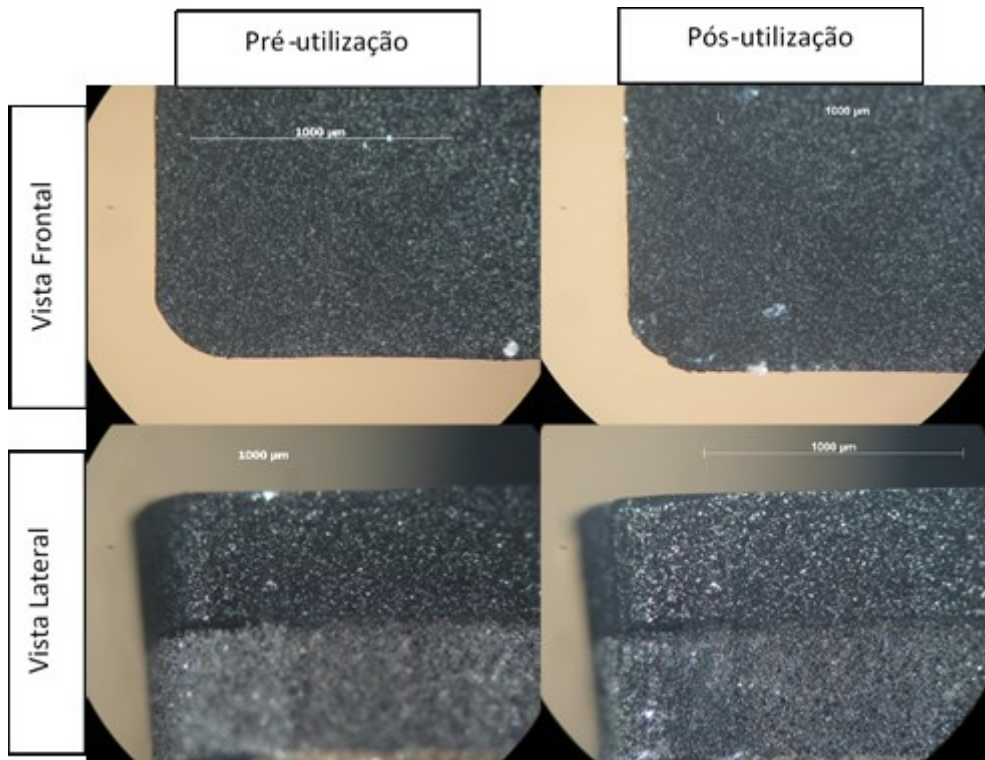


Figura 62 Desgaste do inserto nº 2 da ferramenta 8 M 02

Em relação à ferramenta 8M02 não é possível visualizar falhas/desgastes relevantes, apenas uma eventual cratera que originou fratura no inserto nº1 no entanto é de salientar que esta ferramenta esteve a maquinar muito menos tempo que a ferramenta 8M01, utilizando os mesmos parâmetros que esta. Sendo assim, podemos concluir que um cliente optou por prolongar a vida da ferramenta em função do bom acabamento que daria a peça enquanto o outro optou por um excelente acabamento da peça, no entanto a ferramenta teve uma vida útil bastante reduzida.

## 5. Análise dos Resultados

Na seguinte tabela podemos verificar, de forma mais simplificada o que aconteceu com todas as ferramentas.

Tabela 26 Resumo do percurso das ferramentas

Ferramenta	Tempo de maquinação (min)	Distância maquinada (m)	Principais falhas/desgaste verificados	Observações
04M01	-	-	-	Ferramenta inapta para maquinação (erro de produção)
04M02	2145	4354	Pequenas Fraturas Desgaste na face de saída	
04M03	-	-	-	Erro de maquinação
04M04	1328	2660	-	Ferramenta continuou em processos de maquinação
04M05	1216	1765	Pequenas Fraturas	Não é notório o desgaste na face de saída nem de ataque
04M06	1410	2833	Pequenas Fraturas	Não é notório o desgaste na face de saída nem de ataque
04M07	-	1705	-	Ferramenta inapta para maquinação (erro de produção)
04M08	840		Fraturas; Deformação Plástica	Melhoria dos parâmetros e da refrigeração utilizada
08M01	1516	6766	Fraturas; Desgaste da face de saída	Os parâmetros de corte devem ser otimizados para esta ferramenta ou outros fatores como a refrigeração
08M02	728	5020	Cratera e fraturas.	Não apresenta defeitos, pois maquinou durante um tempo bastante reduzido
12M01	3372	6060	Desgaste da face de ataque; Desgaste da face de saída; Deformação plástica	Melhorar parâmetros como a velocidade de corte e avanço; Melhorar a refrigeração utilizada

<b>12M02</b>	3336	985	Fraturas; Desgaste da face de ataque; Desgaste da face de saída; Deformação plástica	Melhorar parâmetros como a velocidade de corte e avanço; Melhorar a refrigeração utilizada
<b>12M03</b>	3030	2840	Cratera e Fraturas; Desgaste da face de saída; Deformação plástica	Melhorar parâmetros como a velocidade; Melhorar a refrigeração utilizada
<b>12M04</b>	648	3830	Cratera e Fraturas; Deformação plástica	Erro de maquinação
<b>12M05</b>	1420	5600	Cratera e Fraturas; Desgaste da face de saída	Melhora parâmetros como a velocidade e o avanço
<b>12M06</b>	2520	4976	-	Ferramenta continuou em operações de maquinação
<b>12M07</b>	2791	2653	Cratera e Fraturas; Desgaste da face de saída	Melhora parâmetros como a velocidade e o avanço
<b>12M08</b>	3301	1274	-	Ferramenta continuou em operações de maquinação

Após os resultados obtidos foi possível tirar algumas considerações, no entanto devido às ferramentas que ficaram inaptas esta análise ficou incompleta. Nas ferramentas de diâmetro 4mm não é tão evidente as avarias/desgastes, como nas outras ferramentas, no entanto pode-se verificar que estas apresentaram pequenas fraturas. As ferramentas de diâmetro de 12mm apresentaram essencialmente desgaste da face de saída, deformação plástica e crateras que originaram fraturas. Em relação às ferramentas de diâmetro de 8mm, verificou-se que a ferramenta 08M01 apresentou mais avarias/desgastes, o que seria de esperar tendo em conta que maquinou muito mais tempo que a outra ferramenta, apresentando fraturas e desgaste da face de saída, enquanto a ferramenta 08M02 apresentou uma pequena cratera que originou fraturas.

Na figura 63 temos um gráfico representativo de cada ferramenta em função do tempo que estiveram em maquinação. Através do gráfico podemos concluir que quanto maior o diâmetro maior será o tempo de maquinação, pois as ferramentas de diâmetro 12 foram as que estiveram mais tempo em maquinação com a exceção das ferramentas 12 M 04 e

12 M 05. Na ferramenta 12 M 04 ocorreu um erro de maquinação o que explica o pouco tempo de maquinação que esta teve. Em relação a ferramenta 04 M 02, esta obteve um excelente resultado quando comparada com as outras ferramentas, esta situação acontece pois esta ferramenta foi utilizada por um cliente diferente num tipo de grafite diferente do habitual.

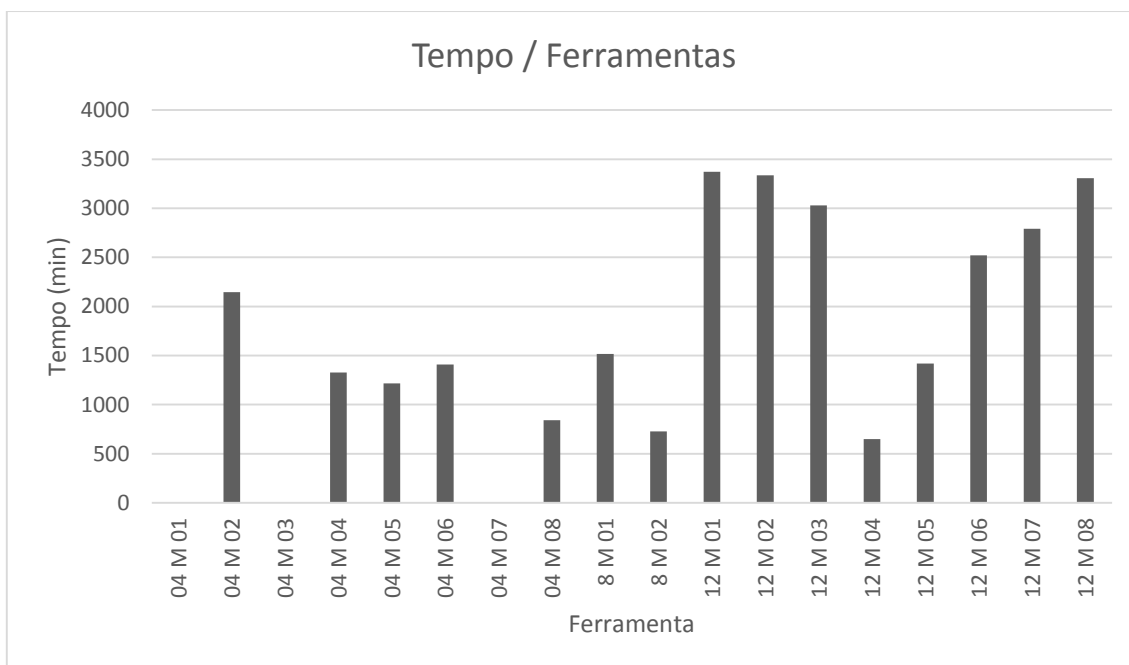


Figura 63 Gráfico Tempo / Ferramentas

Na Figura 64 podemos observar o tempo médio de maquinação em função do tipo de PCD utilizado. Aqui podemos concluir que o PCD do tipo CTH 0 25 permite mais horas de maquinação, o que pode ser explicado pelo facto de apresentar um maior tamanho de grão e consequentemente ser mais resistente que os outros tipos de PCD. Deste modo, se uma empresa pretender uma ferramenta que dure mais tempo deve utilizar o PCD CTH 0 25 mas se pretender melhor qualidade de acabamento deve utilizar o tipo de PCD CTB 010, cujo tamanho do grão é mais pequeno.

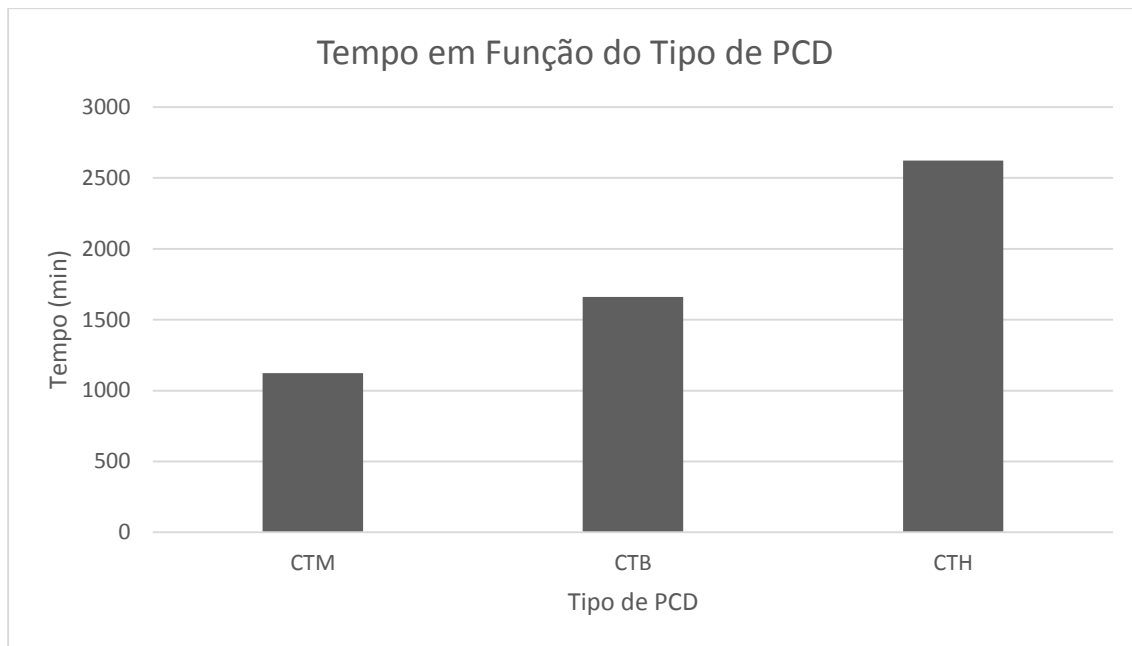


Figura 64 Gráfico Tempo / Tipo de PCD

Apenas com o aumento de  $V_f$ , para o caso das ferramentas 05 e 06 que são utilizadas para maquinar o mesmo tipo de grafite e com parâmetros de corte similares, existe um incremento no tempo de trabalho útil bem como um aumento da distância maquinada. No caso da distância maquinada um aumento de 62% (mais 1068m) e na caso do tempo um aumento de 15% (mais 196 min).

De seguida serão apresentadas algumas conclusões em função dos diferentes diâmetros de ferramentas utilizados.

Em relação às duas ferramentas de diâmetro 8mm, seria de esperar tempos de maquinação intermédios, pois estiveram a maquinar com valores de avanço, velocidade de corte, rotação e velocidade de avanço intermédios, no entanto estas ferramentas utilizaram outro tipo de PCD. Deste modo, é evidente que fatores como o operador, o tipo de grafite maquinada, entre outros que não foram considerados neste estudo influenciam bastante os resultados obtidos. Estas duas ferramentas estiveram a maquinar com os mesmos parâmetros, no entanto a ferramenta 8 M 01 maquinou grafite com uma densidade de  $1,83 \text{ g/cm}^3$  e com tamanho do grão de  $7 \mu\text{m}$  enquanto a ferramenta 8 M 02 maquinou grafite de densidade igual a  $1,78 \text{ g/cm}^3$  e com tamanho de grão de 10 a  $12 \mu\text{m}$ , o que faz com que a ferramenta 8 M 01 apresente um tempo de maquinação muito superior ao da ferramenta 8 M 02.

Nas ferramentas de diâmetro 4mm não se obtiveram três resultados (ferramentas 04M01, 04M03 e 04M07), no entanto foi possível tirar algumas considerações relativamente às

restantes. A ferramenta 04M02 maquinou com avanço, velocidade de corte e rotação mais baixos que as outras ferramentas, o que pode explicar o facto de esta ter estado em maquinação por um período de tempo maior. Em relação à ferramenta 04M08, esta maquinou com avanço elevado e velocidade de corte e rotação baixas e esteve a maquinar durante pouco tempo, o que permite concluir que a conjugação de parâmetros não foi a correta para esta ferramenta. As outras ferramentas estiveram um tempo de maquinação próximo, estando a maquinar com a mesma velocidade de corte e rotação.

Na Figura 65 temos um gráfico que mostra o tempo de maquinação médio em função dos valores de velocidade de corte utilizados para as ferramentas de diâmetro 12mm. Aqui podemos concluir que o valor de velocidade de corte mais baixo obteve um melhor tempo de maquinação pelo que é recomendável a utilização de valores de velocidade de corte mais baixos, para se obter uma boa qualidade superficial (acabamento).

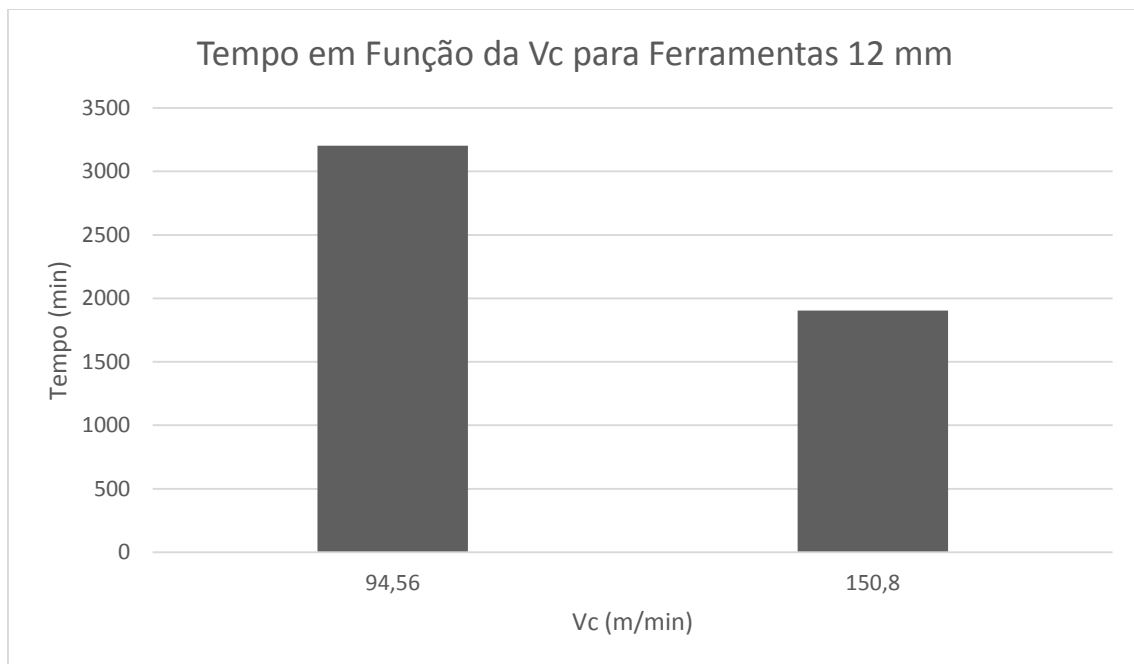


Figura 65 Gráfico Tempo / Velocidade de Corte para Ferramentas com 12 mm de Diâmetro

Analisando o tempo médio de maquinação em função dos valores de rotação utilizados para as ferramentas de diâmetro 12mm é possível verificar que quanto menor o valor de rotação maior será a vida de uma ferramenta (Figura 66).

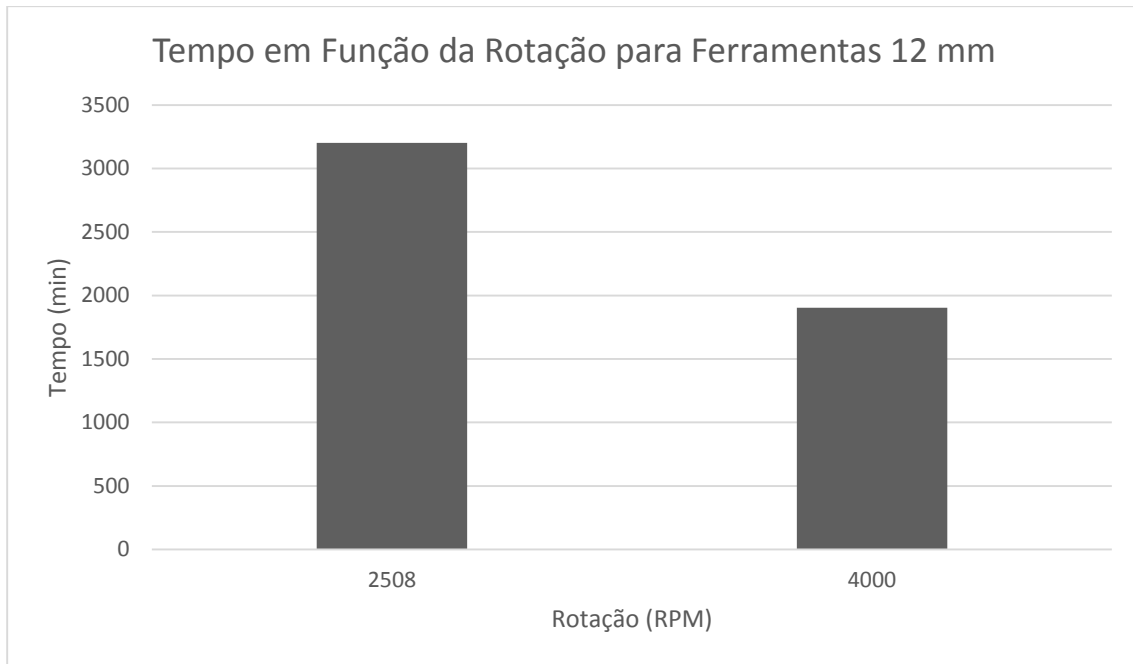


Figura 66 Gráfico Tempo / rotação para Ferramentas com 12 mm de Diâmetro

Foi analisado o tempo de maquinação em função do avanço por dente tendo também em conta o tipo de PCD utilizado nas ferramentas de diâmetro 12mm. Assim, da Figura 67 e Figura 68 podemos concluir que quanto maior for o avanço por dente maior será a vida da ferramenta. No entanto, a ferramenta 12 M 07 que utilizou PCD do tipo CTB 010 e um avanço por dente de 0,4 mm/dente apresenta valores desviados, pois esperava-se que estivesse a maquinar mais tempo que a ferramenta 12M08, tendo provavelmente ocorrido algum problema com estas ferramentas.

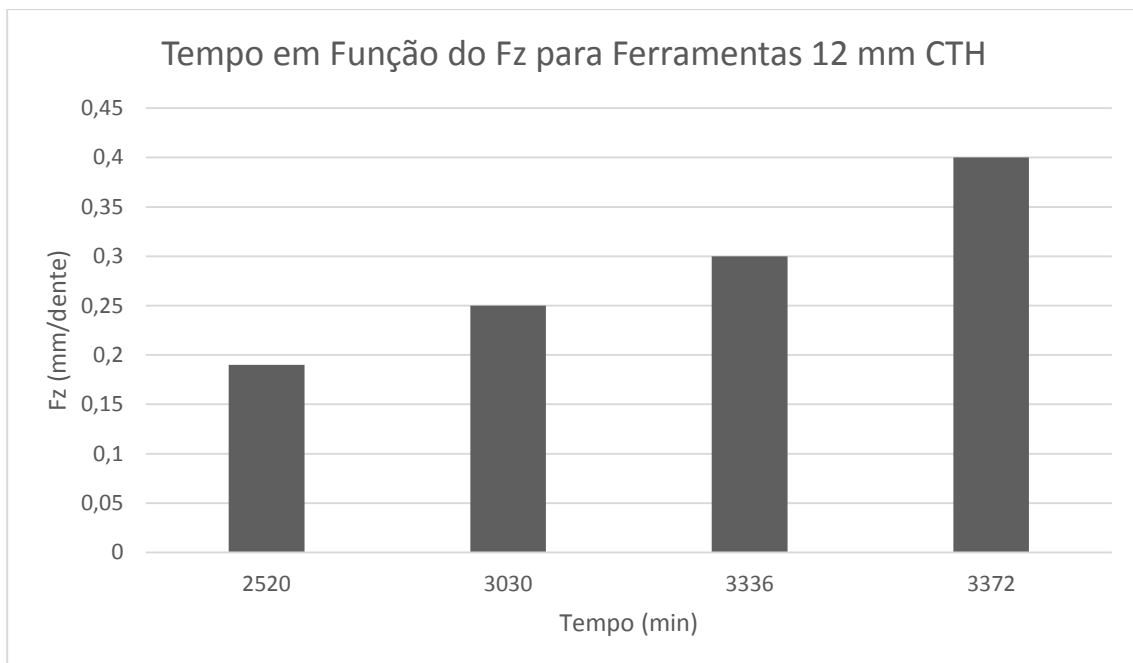
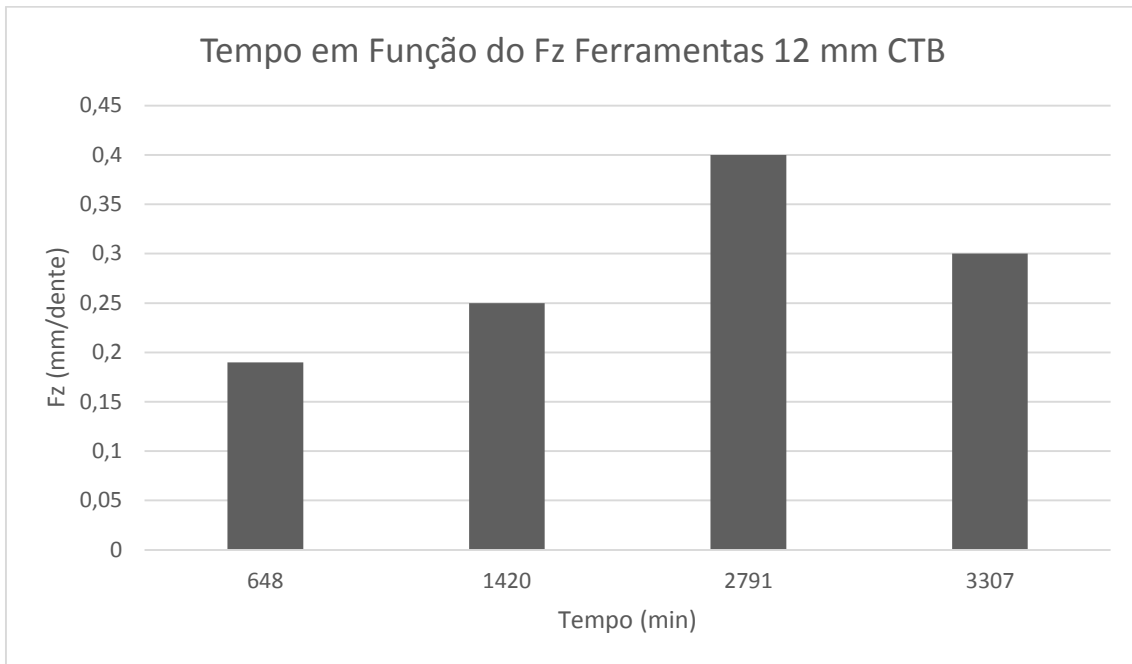


Figura 67 Tempo / Fz para Ferramentas com Diâmetro de 12mm e CTH como tipo de PCD



*Figura 68 Tempo / Fz para Ferramentas com Diâmetro de 12mm e CTB como tipo de PCD*

De salientar que nas ferramentas de diâmetro 4mm, os resultados incompletos mostram as mesmas tendências verificadas anteriormente.



## 6. Conclusão

---

A realização deste projeto permitiu adquirir conhecimentos sobre a utilização e comportamento de ferramentas com insertos em diamante policristalino em maquinação da grafite. Ajudou a perceber qual é o PCD mais indicado e que apresenta melhor rendimento em operações de acabamento de elétrodos. Permitindo verificar quais os parâmetros de maquinação mais adequados na maquinação de grafite.

A primeira fase permitiu perceber qual dos insertos seria o mais indicado na maquinação da grafite. Podemos concluir que o PCD do tipo CTH 0 25 permite mais horas de maquinação. Este PCD apresenta um maior tamanho de grão que os outros tipos de PCD. Deste modo, para uma vida mais longa da ferramenta deve ser utilizado preferencialmente o PCD CTH 0 25, mas se pretender melhor qualidade de acabamento deve utilizar o tipo de PCD CTB 010, cujo tamanho do grão é mais pequeno. Fatores como o tamanho do grão e quantidade de ligante influenciam bastante o comportamento destas ferramentas, sendo o PCD CTB 010, que possui o grão mais fino o que apresenta, aparentemente, o maior desgaste.

De focar que embora as ferramentas apresentem algum desgaste a nível do raio de canto ainda estão em condições para executar operações de desbaste. Assim é possível promover uma segunda vida para este tipo de operações.

Nas ferramentas de diâmetro 4mm foi mais difícil visualizar as falhas/defeitos dos insertos podendo-se concluir que estas ferramentas estiveram a maquinar com parâmetros bastantes aproximados dos ideais para este tipo de maquinação e ferramenta.

Assim a utilização de parâmetros de maquinação mais baixos, como o avanço, a velocidade de corte e a rotação temos uma vida das ferramentas maior, mas para o incremento das taxas de remoção e da produtividade nem sempre é possível atuar nestas gamas mais baixas e mais favoráveis para a estabilidade do processo e da ferramenta.



# Trabalhos Futuros

---

Relativamente a trabalhos futuros proponho:

- Análise dos parâmetros de corte com maior influência na vida da ferramenta;
- Otimização dos parâmetros de corte que permitam impor maiores taxas de remoção;
- Estudo sobre os diferentes tipos de insertos.



# Bibliografia

---

1. MACEDO, N; Estudo e desenvolvimento de grafite como agente anti – chama para PVC; 2011;
2. ANGELOTTI, A; FILHO, N; Produção de Grafita com a Utilização de Carvão Vegetal como Matéria – Prima; Outubro de 2014; Disponível em: [http://www.fecilcam.br/nupem/anais\\_ix\\_epct/PDF/TRABALHOSCOMPLETO/Anais-ENG/04.pdf](http://www.fecilcam.br/nupem/anais_ix_epct/PDF/TRABALHOSCOMPLETO/Anais-ENG/04.pdf); Consultada a 01/06/2016;
3. KRATOCHVIL, R; Fresamento de Acabamento em altas Velocidades de Corte para Eletrodos de Grafita Industrial; Universidade Federal de Santa Catarina; Março de 2004;
4. MULLER, A; CARVALHO, C; BRITES, F; SILVEIRA, G; Análise da Usinagem por Eletroerosão com Diferentes Eletrodos-Ferramenta; Maio de 2015; Disponível em: <http://www.cobef.com.br/anais/PDFS/COF-2015-0005.PDF>; Consultado a 18/07/2016;
5. GF Machining Solutions; Graphite Electrodes; Disponível em: [https://www.georgfischer.com/content/gfac/country\\_CH/en/customerservices/operations-support/consumables-/graphites-.html](https://www.georgfischer.com/content/gfac/country_CH/en/customerservices/operations-support/consumables-/graphites-.html); Consultado a 18/07/2016;
6. MERSEN; Graphite Advantages; Disponível em: <http://www.edm.mersen.com/graphite-advantages/>; Consultado a 18/07/2016;
7. BATISTA, R; Tendências do Corte por Arranque de Apara – Maquinagem; Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica; Opção Produção, Desenvolvimento e Engenharia Automóvel 5º Ano; Novembro de 2010;
8. FERREIRA, A; Processos de Fabrico I; Janeiro de 2015; Disponível em: [http://estudomec.info/files/PF1\\_Resumo.pdf](http://estudomec.info/files/PF1_Resumo.pdf); Consultado a 06/06/2016;
9. SERVO, J; Seleção de um material alternativo para a estrutura de máquinas - ferramentas de arranque de apara; Universidade do Minho; Escola de Engenharia; Dezembro de 2013;

10. SANTOS, P; Tecnologia CAM Aplicada no Fabrico por Fresagem de Componentes Mecânicos - Caracterização do processo de fresagem e dos componentes produzidos; Instituto Politécnico de Coimbra; Dezembro de 2013;
11. SELADA, A; FIDELIS, N; SOARES, R; Estudo sobre Tecnologias nucleares do Sector de Engineering and Tooling and Tooling com Potencial de Aplicação Noutros Sectores; Centimfe – Centro Tecnológico da Indústria de Moldes, Ferramentas Especiais e Plásticos; 2010; Disponível em: [http://www.cefamol.pt/cefamol/pt/Cefamol\\_Publicacoes/Estudos/PloneArticle.20151126.3910491036/Attachment00080993/Estudo%20Tecnologias%20Nucleares%20do%20Sector%20Engineering%20Tooling.pdf](http://www.cefamol.pt/cefamol/pt/Cefamol_Publicacoes/Estudos/PloneArticle.20151126.3910491036/Attachment00080993/Estudo%20Tecnologias%20Nucleares%20do%20Sector%20Engineering%20Tooling.pdf); Consultado a 08/06/2016;
12. STEMMER, Caspar Erich; *Ferramentas de Corte*; Brasil; Editora da UFSC, 1989;
13. LIMA, D; Variações do Grafeno: Uma abordagem AB-Initio de Novas estruturas Bidimensionais; 2012;
14. FERREIRA, A; GONÇALVES, C; BRANCO, V; O Carboneto de Silício e os Compósitos de Diamante – Cerâmica; Universidade do Porto; Faculdade de Engenharia FEUP; 2012;
15. EMUGE; FRANKEN; Tecnologia de maquinação; Diamante – PCD – CBN; Ferramentas de fresagem de alto rendimento; Disponível em: [http://www.emuge-franken.com.br/produtos/catalogo/zp20022\\_pt.pdf](http://www.emuge-franken.com.br/produtos/catalogo/zp20022_pt.pdf); Consultado a 13/06/2016;
16. MACIEL, M; Caracterização das pastilhas de diamante Policristalino Aplicadas em Brocas de Perfuração; Junho, 1998;
17. SOUZA, A; Processos de Fabricação por Usinagem – Parte 2; Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Escola de Engenharia; Departamento de Engenharia Mecânica; 2011;
18. SOUZA, A; Processo de Torneamento: Vida da Ferramenta de Corte; Disponível em: <https://chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/ApostilaUsinagem-Aula21-p.157-162.pdf>; Consultado a 08/03/2017;
19. CARRIÇO, V; Avarias e Desgastes da Ferramenta; Disponível em: [http://professorv18.dominiotemporario.com/doc/Aula\\_06\\_\\_PFM\\_\\_Avarias\\_e\\_Desgastes\\_da\\_Ferramenta.pdf](http://professorv18.dominiotemporario.com/doc/Aula_06__PFM__Avarias_e_Desgastes_da_Ferramenta.pdf); Consultado a 14/06/2016;

20. Moldes Injeção Plásticos; Avarias e Desgastes de Ferramentas de Corte; Disponível em: <http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/avarias.asp>; Consultado a 08/03/2017;
21. ALEGRE, H; Processos de Fabricação por Usinagem; Junho de 2003; Disponível em: <http://www.ebah.pt/content/ABAAAfQ2wAl/desgaste-ferramentas-corte#>; Consultado a 14/06/2016;
22. MITSUBISHI; Datos Tecnicos; Desgaste y Rotura de la Herramienta; Disponível em: [https://www.mitsubishicarbide.com/EU/es/product/pdf/c\\_n\\_other/c006s\\_n.pdf](https://www.mitsubishicarbide.com/EU/es/product/pdf/c_n_other/c006s_n.pdf); Consultado a 09/03/2017;
23. DUARTE, J; Análise de Ferramentas de Corte com Insertos em Diamante Policristalino; Instituto Politécnico de Leiria; Escola Superior de Tecnologia e Gestão; 2014;
24. AMORIM, F; Eletroerosão por Fio de Metal Duro Utilizado para Ferramentas de Estampagem; Pontifícia Unicersidade Católica do Paraná – PUCPR;
25. JUNG, A; BORTOLIN, E; Soldagem por Brasagem; Faculdade Horizontina; Disponível em: <http://pt.slideshare.net/mendes007/soldagem-por-brasagem>; Consultado a 18/07/2016;
26. CONIEX; Decapagem; 2016; Disponível em: <http://www.coniex.pt/pt/catalogo/go/tratamento-superficies-decapagem-jacto-abrasivo>; Consultado a 18/07/2016;
27. DOMINGUES, R; OLIVEIRA, F; ESPERTO, L; Desenho de Experiências – Estratégias; Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação; Departamento de materiais e Tecnologias de Produção;
28. DELGADO, I; Aplicação do desenho de experiências na otimização da quantificação de isocianatos livres em materiais em contato com alimentos; Faculdade de Ciências e Tecnologia; Universidade Nova de Lisboa; Dezembro de 2012;
29. ESTEVES, E; SOUSA, C; Planeamento Experimental; 2007; Disponível em: <http://w3.ualg.pt/~eesteves/docs/planeamentoexperimental.pdf>; Consultado a 18/07/2016;

30. GRECO, J; FABBRI, G; Considerações Sobre Planejamento e Análise de Experimentos Fatoriais Fracionários Assimétricos – Exemplo de Aplicação a um Caso de Infra – Estrutura de Transportes; 2003; Disponível em: [http://www.dec.uem.br/eventos/enteca\\_2003/Temas/tema6/012.PDF](http://www.dec.uem.br/eventos/enteca_2003/Temas/tema6/012.PDF); Consultado a 18/072016.
31. ELEMENTSIX; GIVING TOOLMAKERS A COMPETITIVE EDGE - With PCD, PCBN, CVD Diamond & Single Crystal Diamond; Disponível em: [http://www.e6.com/wps/wcm/connect/bf587a13-f0ef-42d9-a51f-bb3e1af2e920/E6\\_Metalworking\\_A4\\_English\\_R5\\_VIZ.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=bf587a13-f0ef-42d9-a51f-bb3e1af2e920](http://www.e6.com/wps/wcm/connect/bf587a13-f0ef-42d9-a51f-bb3e1af2e920/E6_Metalworking_A4_English_R5_VIZ.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=bf587a13-f0ef-42d9-a51f-bb3e1af2e920); Consultado a 06/07/2016;

# Glossário

---

**Cadinhos** - É um recipiente normalmente com características refratárias, resistente a temperaturas elevadas, onde se fundem materiais a altas temperaturas.

**Coque** - É um tipo de combustível derivado da hulha (carvão betuminoso).

**Apara** - É o material removido durante o processo de maquinação, cujo objetivo é obter uma peça com forma e dimensões definidas.

**Face de saída** - Superfície da cunha voltada para a peça.

**Gume** - É o encontro com a face de saída, destinada a operação de corte.

