

2008

Departamento de  
Engenharia Metalúrgica e  
de Materiais

Mestrado Integrado em  
Engenharia Metalúrgica e  
de Materiais



Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia  
**FEUP**

# [AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE FERRAMENTAS COM DIFERENTES TIPOS DE DIAMANTE POLICRISTALINO]

Trabalho realizado por: Ricardo Gonçalves



**Disciplina:** Tese de Mestrado

**Orientador FEUP:** Professor Doutor Luís Filipe Malheiros

**Orientador Empresa:** Eng.º Fernando Figueiredo

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à FREZITE – Ferramentas de Corte, S.A., em especial ao Sr. Eng. José Manuel Fernandes e ao Eng. Fernando Figueiredo, pela oportunidade que me concederam para a realização deste trabalho.

Queria agradecer, de um modo especial, ao meu orientador Professor Luís Filipe Malheiros, pela orientação, disponibilidade, incentivo, conhecimento e apoio que me dispensou.

Ao Eng. Paulo Esteves, Eng. Paulo Neves, Eng. Fátima Santos, Eng. José Lima gostaria de agradecer por toda a ajuda e apoio durante o meu estágio na FREZITE.

Quero agradecer a todos os funcionários da FREZITE que sempre se mostraram disponíveis, em particular ao Sr. Adelino Silva, que tornou possível este trabalho pelo apoio, disponibilidade e conhecimentos que me transmitiu.

Gostaria de agradecer ao CEMUP por disponibilizar as suas instalações, e, em particular, ao Dr. Carlos Sá pela simpatia com que me acolheu e pela ajuda.

Queria agradecer ao laboratório de Tribologia, Vibrações e Manutenção Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP pela disponibilidade e ajuda dispensada, em particular ao Eng. Ramiro Martins.

Agradeço à minha mãe pelo exemplo de força; sem ela nada disto seria possível. À minha irmã, e aos meus amigos, que sempre me apoiaram, mesmo nos momentos difíceis, e continuam a transmitir-me todo o carinho e amizade.

## Resumo

Este trabalho teve como objectivo o desenvolvimento e o acompanhamento do processo de fabrico de ferramentas de corte de diamante policristalino utilizadas na maquinagem de madeira e seus derivados. Pretendeu-se comparar alguns tipos de diamante policristalino de fornecedores diferentes, para uma dada aplicação, de modo a otimizar o rendimento das ferramentas diamantadas fabricadas na FREZITE.

A comparação foi estabelecida entre tipos de diamante policristalino da ELEMENT SIX, que é o principal fornecedor de diamante da FREZITE, e da ILJIN. Mais especificamente, foram estabelecidas comparações entre o CTB010 (da ELEMENT SIX) e o CMW (da ILJIN) e, numa segunda fase, entre o CTH025 (da ELEMENT SIX) e o CLX-II (da ILJIN).

As ferramentas com o diamante ILJIN foram fabricadas durante a realização deste trabalho, tendo sido comparado o seu desempenho com o de ferramentas de clientes contendo diamante da ELEMENT SIX, que já se encontravam em operação. Foi feita uma análise comparativa tendo em conta quatro aspectos: microestrutura, duração da operação de afiamento por electroerosão, qualidade superficial após afiamento e durabilidade de cada ferramenta.

Foi ainda estudada a variação de parâmetros numa máquina de electroerosão utilizada no afiamento numa ferramenta de corte com o diamante policristalino mais utilizado na FREZITE, o CTB010, para tentar relacionar o efeito dessas alterações com a qualidade da aresta de corte após afiamento e com o tempo de trabalho da máquina de electroerosão.

## **Abstract**

The aim of this work was the development and monitoring of polycrystalline diamond tools for wood and engineered wood cutting. It was pretended to compare different types of polycrystalline diamond from different suppliers for a determined application in a way that it could be possible to optimize the yield of the diamond tools fabricated by FREZITE.

The comparison was established between different types of polycrystalline diamond from ELEMENT SIX, which is the main supplier for FREZITE, and different types of polycrystalline diamond from ILJIN. Specifically, the comparisons were established between CTB010 (ELEMENT SIX) and CMW (ILJIN), and, in a second test, between CTH025 (ELEMENT SIX) and CLX-II (ILJIN).

The tools with diamond from ILJIN were fabricated during this internship and were compared with tools from clients using diamond of ELEMENT SIX, which were already in operation. The comparison analysis was focused on 4 points: microstructure, sharpening time by electroerosion, surface quality after sharpening by electroerosion and durability of the tools.

The variation of parameters of an electroerosion machine for the sharpening of a tool with the most common polycrystalline diamond used in FREZITE, CTB010, was also studied to relate the effect of the alteration of parameters (voltage impulses) with the cutting edge quality after sharpening and working time of the electroerosion machine.

## Lista de tabelas

**Tabela 1** – Materiais para ferramentas de corte, listados segundo a ordem cronológica do seu aparecimento.

**Tabela 2** – Propriedades de alguns materiais usados no fabrico de ferramentas de corte.

**Tabela 3** – Campos de aplicação das ferramentas PCD.

**Tabela 4** – Comprimento da amostragem (Cut-Off).

**Tabela 5** – Esquema representativo dos testes comparativos entre as ferramentas de corte de diamante policristalino.

**Tabela 6** – Parâmetros analisados no Paqui (50x) CTB010.

**Tabela 7** – Parâmetros analisados no Paqui (50x) CMW.

**Tabela 8** – Tempos de afiamento das ferramentas de corte com CTB010 e CMW na máquina de electroerosão (Vollmer QM 110 eco).

**Tabela 9** – Valores de rugosidade obtidos no Hommel Tester T4000 para o CTB010 e o CMW.

**Tabela 10** – Metros lineares cortados por ambas as ferramentas.

**Tabela 11** – Parâmetros analisados no Paqui (50x) CTH025.

**Tabela 12** – Parâmetros analisados no Paqui (50x) CLX-II.

**Tabela 13** – Tempos de afiamento das ferramentas de corte com CTB010 e CMW na máquina de electroerosão (Vollmer QM 110 eco).

**Tabela 14** – Valores de rugosidade obtidos no Hommel Tester T4000 para o CTH025 e o CLX-II.

**Tabela 15** – Metros lineares cortados por ambas as ferramentas.

**Tabela 16** – Disposição das graduações de heroazo.

**Tabela 17** – Esquema da configuração definida para o afiamento com a variação dos impulsos da corrente.

**Tabela 18** – Tempos registados referentes ao afiamento de cada bit.

**Tabela 19** – Valores de rugosidade obtidos na superfície de saída de cada bit afiado, adquiridos numa Hommel tester T4000.

**Tabela 20** – Exemplo hipotético dum afiamento para uma ferramenta diamantada de acabamento para piso flutuante (3 steps – 48 bits em cada step com as diferentes configurações de graduações de erosão, variando os impulsos de corrente).

## **Lista de figuras**

**Figura 1** – Correlação entre as propriedades mais relevantes dos materiais utilizados no fabrico de ferramentas de corte.

**Figura 2** – Principais movimentos de corte que induzem formação de apra.

**Figura 3** - Ângulos que determinam a geometria de corte.

**Figura 4** – Diferentes tipos de construção de ferramentas de corte.

**Figura 5** – Esquema representativo do processo HPHT.

**Figura 6** – Processo HPHT para a fabricação de discos de ferramentas PCD.

**Figura 7** – Corte de um disco em bits, antes da brasagem ao corpo da ferramenta.

**Figura 8** – Microestruturas das diferentes séries de PCD. (A – Grão grosseiro; B – Grão médio; C – Grão fino).

**Figura 9** – “Chipping” de um bit duma broca de PCD utilizada para cortar piso flutuante.

**Figura 10** – Imagem de desgaste abrasivo dum dente duma serra de PCD utilizada para cortar contraplacado.

**Figura 11** – Modos de desgaste durante o corte de piso flutuante:

(a) ruptura intergranular; (b) ruptura por clivagem.

**Figura 12** – Esquema representativo duma sonda a efectuar o varrimento duma superfície.

**Figura 13** – Perfil efectivo obtido a partir dum rugosímetro (sem filtrar as ondulações).

**Figura 14** – Perfil de rugosidade (com filtro).

**Figura 15** – Esquema dos diversos comprimentos de medida utilizados na rugosidade.

**Figura 16** – Definição do conceito de linha média.

**Figura 17** – Determinação do parâmetro Ra.

**Figura 18** – Diferentes perfis de rugosidade com o mesmo valor de Ra.

**Figura 19** – Determinação do parâmetro Ry.

**Figura 20** – Diversas formas de rugosidade com o mesmo valor para  $R_y$ .

**Figura 21** – Determinação do parâmetro  $R_t$ .

**Figura 22** – Determinação do parâmetro  $R_z$ .

**Figura 23** – Esquema representativo dos elementos básicos de um sistema para electroerosão.

**Figura 24** – Esquema representativo dum pavimento laminado (piso flutuante).

**Figura 25** – Corte do disco de diamante em bits por electroerosão por fio.

**Figura 26** – Corte por serra mecânica das patelas de aço.

**Figura 27** – Aspecto das ferramentas após torneamento:

a) Parte I; b) Parte II.

**Figura 28** – Aspecto das ferramentas após operação de fresagem:

a) Parte I; b) Parte II.

**Figura 29** – Brasagem das plaquetas de PCD no corpo da ferramenta.

**Figura 30** – Aspecto das ferramentas após conclusão da sequência de fabrico:

a) Parte I; b) Parte II.

**Figura 31** – Microestrutura do diamante policristalino (CTB010) a uma ampliação de 50x.

Fase clara – Grãos de diamante / Fase escura – Cobalto.

**Figura 32** – Microestrutura do diamante policristalino (CMW) a uma ampliação de 50x. Fase

clara – Grãos de diamante / Fase escura – Cobalto.

**Figura 33** – Afiamento por electroerosão da ferramenta de diamante policristalino (ILJIN) na

Vollmer QM 110 eco.

**Figura 34** – Perfis de rugosidade:

1 – Superfície de ataque (CTB010); 2 – Superfície de saída (CTB010);

3 – Superfície de ataque (CMW); 4 – Superfície de saída (CMW).

**Figura 35** – Desgaste sofrido na aresta de corte pelas ferramentas de corte de diamante policristalino:

1 – CTB010; 2 – CMW.

**Figura 36** – Microestrutura do diamante policristalino (CTB025) a uma ampliação de 50x.  
Fase clara – Grãos de diamante / Fase escura – Cobalto.

**Figura 37** – Microestrutura do diamante policristalino (CLX-II) a uma ampliação de 50x.  
Fase clara – Grãos de diamante / Fase escura – Cobalto.

**Figura 38** – Perfis de rugosidade:

1 – Superfície de ataque (CTH025) ; 2 – Superfície de saída (CTH025) ;

3 – Superfície de ataque (CLX-II) ; 4 – Superfície de saída (CLX-II).

**Figura 39** – Desgaste sofrido na aresta de corte pelas ferramentas de corte de diamante policristalino:

1 – CTH025; 2 – CLX-II.

**Figura 40** – Fresa de acabamento de piso flutuante ( 3 steps/ 48 bits em cada step).

**Figura 41** – Programa gerador de erosão da Vollmer QM 110 eco.

**Figura 42** – Ferramenta de corte de diamante policristalino de grão médio (10µm) da ELEMENT SIX.

**Figura 43** – Parâmetros referentes a uma graduação de erosão da Vollmer QM 110 eco.

**Figura 44** – Electroerosão por mó da ferramenta de diamante policristalino na Vollmer QM 110 eco.

**Figura 45** – Perfis de rugosidade:

1 – Bit 1 ; 2 – Bit 2 ; 3 – Bit 3 ; 4 –Bit 4.

# Índice

|   |    |
|---|----|
| 1. Objectivos .....   | 1  |
| 2. Enquadramento .....  | 1  |
| 3. Ferramentas de corte.....  | 1  |
| 3.1. Tipos de movimentos .....  | 3  |
| 3.2. Critérios para o projecto e construção de ferramentas de corte .....   | 4  |
| 3.3. Formas de construção de ferramentas .....  | 5  |
| 4. Ferramentas de corte de diamante policristalino.....   | 6  |
| 4.1. Introdução.....  | 6  |
| 4.2. Tipos e tamanhos de ferramentas de diamante policristalino.....  | 9  |
| 4.3. Propriedades das ferramentas de diamante policristalino .....  | 10 |
| 4.4. Campos de aplicação das ferramentas de corte de diamante policristalino .....  | 10 |
| 4.5. Tipos de desgaste do diamante policristalino na maquinaria de madeira e de seus derivados .....  | 12 |
| 4.6. Vantagens das ferramentas de corte de diamante policristalino.....   | 14 |
| 5. Rugosidade Superficial.....  | 15 |
| 5.1. Medição .....  | 15 |
| 5.2. Análise da qualidade superficial.....  | 16 |
| 5.2.1. Critérios para avaliar a rugosidade .....  | 17 |
| 5.2.2. Sistemas de medição da rugosidade superficial.....   | 18 |
| 5.3. Parâmetros de amplitude de rugosidade.....   | 19 |
| 5.3.1. Rugosidade média (Ra) .....  | 19 |
| 5.3.2. Rugosidade máxima (Ry).....  | 21 |
| 5.3.3. Rugosidade total (Rt) .....  | 21 |
| 5.3.4. Profundidade média de rugosidade (Rz) .....  | 21 |
| 6. Electroerosão .....  | 22 |
| 6.1. Princípio físico da electroerosão .....  | 23 |
| 6.2. Factores que influenciam a electroerosão .....   | 25 |
| 6.3. Fluido dieléctrico .....   | 25 |
| 6.4. Electroerosão do diamante policristalino.....  | 26 |
| 7. Avaliação do desempenho de ferramentas de diamante policristalino na maquinaria de piso flutuante com diamante fornecido por dois fornecedores diferentes..... | 26 |
| 7.1. Piso Flutuante.....  | 27 |
| 7.2. Sequência de fabrico das ferramentas .....   | 28 |
| 7.3. Apresentação/Discussão de resultados .....   | 31 |
| 7.3.1. PARTE I (CTB010 vs CMW).....   | 31 |
| 7.3.2. PARTE II (CTH025 vs CLX-II).....   | 36 |
| 7.4. Considerações finais .....   | 42 |
| 8. Influência da variação de parâmetros de electroerosão no afiamento de ferramentas de diamante policristalino.....  | 42 |
| 8.1. Considerações finais .....   | 49 |
| 9. Trabalho Futuro.....   | 49 |
| 10. Bibliografia.....   | 50 |

## 1. Objectivos

O principal objectivo deste trabalho incidiu sobre o desenvolvimento e acompanhamento do processo de fabrico e de afiamento de ferramentas de corte de diamante policristalino de dois fornecedores diferentes utilizadas na maquinagem de madeira e seus derivados para efeitos comparativos do seu desempenho em serviço.

Particular atenção foi dada à influência dos parâmetros da operação de electroerosão no afiamento das ferramentas de diamante policristalino em termos de qualidade da superfície afiada e da sua durabilidade na maquinagem de piso flutuante.

## 2. Enquadramento

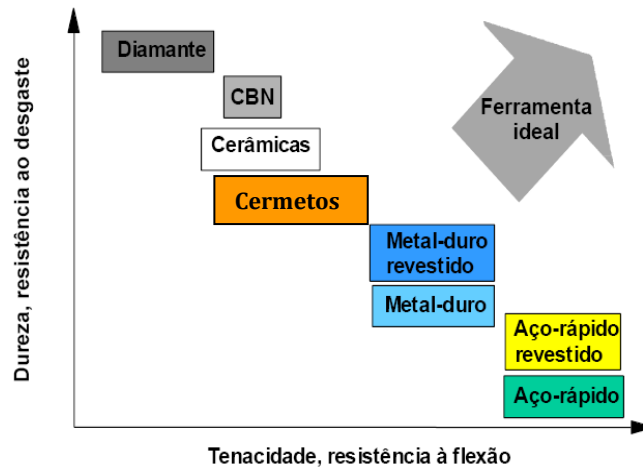
Este trabalho foi realizado na empresa FREZITE, Ferramentas de Corte S.A., sediada no concelho da Trofa, e enquadrado no plano de estudos do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

A FREZITE é uma empresa de engenharia de soluções para ferramentas de corte, com aplicações nas indústrias e sectores da transformação de madeira, plásticos e metais. Criada em 1978, conta com uma vasta experiência na concepção, desenvolvimento e produção de ferramentas de corte por arranque de aparta. Todo o tipo de materiais de corte, tais como diamante policristalino, carbonetos de tungsténio, aços rápidos e “*stellite*”, são comuns nas unidades de concepção, desenvolvimento e produção desta empresa. Mais recentemente, foi criada a «holding» FREZIGEST, na dependência da qual ficam as suas duas áreas: a FREZITE, que produz ferramentas de corte para madeira e seus derivados, e a FMT – FREZITE METAL TOOLING, mais virada para o fabrico de ferramentas para corte de metais. O desenvolvimento deste trabalho ocorreu na divisão que produz ferramentas de corte para madeira e seus derivados <sup>[1]</sup>.

## 3. Ferramentas de corte

O maior desafio no desenvolvimento de ferramentas de corte centra-se exactamente no balanço entre a dureza e a tenacidade dos materiais utilizados no seu fabrico visto que são duas propriedades de extrema importância para o desempenho da ferramenta e que não são facilmente conciliáveis num mesmo material (Figura 1). Actualmente, conseguem-se boas combinações de dureza e de tenacidade, tanto em materiais de ferramenta “brutos” como nos revestidos. As ferramentas revestidas buscam o equilíbrio entre as características necessárias

através do uso de um material base, que confere tenacidade e alguma dureza, e um revestimento, com elevadas dureza, resistência à abrasão e inércia química [2].



**Figura 1** – Correlação entre as propriedades mais relevantes dos materiais utilizados no fabrico de ferramentas de corte [3].

A grande quantidade de critérios a serem considerados (alguns dos quais antagónicos), somada à imensa quantidade de materiais para ferramentas de corte disponíveis no mercado, dificulta a selecção da melhor ferramenta para cada aplicação. Segundo diversos autores, o material de ferramenta ideal deverá ter a dureza do diamante natural, a inércia química da alumina e a tenacidade do aço rápido [2], [4].

A tabela 1 apresenta uma lista de materiais para ferramentas de corte, apresentados por ordem cronológica do seu aparecimento, salvo raras excepções; à medida que se desce na lista, a dureza aumenta e a tenacidade diminui [5].

Em termos de contexto histórico, há dois grupos de materiais que sobressaem, e que podem ser considerados como os mais importantes na evolução das operações de maquinagem, ainda que não sejam os mais eficientes ou tecnologicamente mais desenvolvidos: os aços rápidos e os metais duros.

A importância dos aços rápidos e dos metais duros provém do facto de, na época do seu desenvolvimento, terem permitido os maiores saltos tecnológicos na história dos processos de maquinagem, nomeadamente em termos

|   |
|---|
| 1. Aços ao carbono                              |
| . Comum   |
| . Com elementos de liga (V, Cr)                 |
| 2. Aços Semi-Rápidos (Baixo W)                  |
| 3. Aços Rápidos (obtidos por pulverometalurgia) |
| . Sem revestimento                              |
| . Com revestimento                              |
| 4. Aços Super Rápidos (elevado teor de V)       |
| 5. Metal Duro (com ou sem revestimento)         |
| Classes:  |
| . P   |
| . M   |
| . K   |
| 6. Cermetos (com ou sem revestimento)           |
| 7. Cerâmicas                                    |
| . com ou sem revestimento                       |
| . à base de Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>      |
| . à base de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      |
| 8. Ultraduros                                   |
| . CBN-PCBN                                      |
| . PCD   |
| 9. Diamante Natural                             |

**Tabela 1** – Materiais para ferramentas de corte listados segundo a ordem cronológica do seu aparecimento [5].

do aumento da velocidade de corte de uma ordem de grandeza relativamente aos materiais de corte então utilizados [2].

**Tabela 2** – Propriedades de alguns materiais usados no fabrico de ferramentas de corte [6].

| Material                           | Dureza (HV) | Tensão de rotura transversa (MPa) | Módulo de elasticidade ( $\times 10^2$ GPa) | Coefficiente de dilatação térmica ( $\times 10^{-6}$ /K) | Condu. térmica (W/m.K) |
|------------------------------------|-------------|-----------------------------------|---|--|------------------------|
| <b>Aço-Rápido</b>                  | 700-900     | 2500-4000                         | 2,6-3,0                                     | 9,0-12,0   | 15-48                  |
| <b>Carbonetos</b>                  | 1200-1800   | 1300-3200                         | 4,7-6,5                                     | 4,6-7,5  | 20-80                  |
| <b>Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub></b> | 1350-1600   | 600-900                           | 2,8-3,2                                     | 3,0-3,3  | 20-35                  |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 1450-2100   | 400-800                           | 3,0-4,5                                     | 5,5-8,0  | 10-38                  |
| <b>PCBN</b>                        | 3500-4000   | 500-800                           | 6,8   | 4,9  | 100                    |
| <b>PCD</b>                         | 5000-6000   | 600-1100                          | 8,4   | 1,5  | 550                    |

### 3.1. Tipos de movimentos

Na análise de qualquer processo de maquinagem é indispensável o estabelecimento de conceitos sobre os movimentos de corte. Estes conceitos devem ser tidos em conta e utilizados por todos os que se dedicam à tecnologia de maquinagem, projecto e fabrico de ferramentas de corte. As principais associações ligadas a estes sectores procederam à uniformização de alguns conceitos através das normas (DIN 6580-1963 e ISO 3002/I-1977).

Os conceitos que se seguem podem ser considerados universais e aplicáveis a quase todos os processos de maquinagem.

Existem duas espécies de movimentos [7]:

- Os que provocam formação de aparas;
- Os que não induzem formação de aparas.

São explicados, de seguida, mais em detalhe, apenas os movimentos que provocam formação de aparas visto que, no contexto deste trabalho, são os que apresentam maior relevância [7].

. O movimento de corte (movimento entre a peça e a ferramenta em que, durante uma revolução completa, se verifica apenas remoção de aparas);

. O movimento de avanço (movimento entre a peça e a ferramenta que, conjuntamente com o movimento de corte, provoca um levantamento contínuo da aparas);

. O movimento efectivo de corte (movimento resultante da combinação dos dois movimentos anteriores).

A figura 2 esquematiza os principais movimentos associados a cada um dos processos de corte envolvendo arranque de aparas: torneamento, furação, fresagem e rectificação [7].

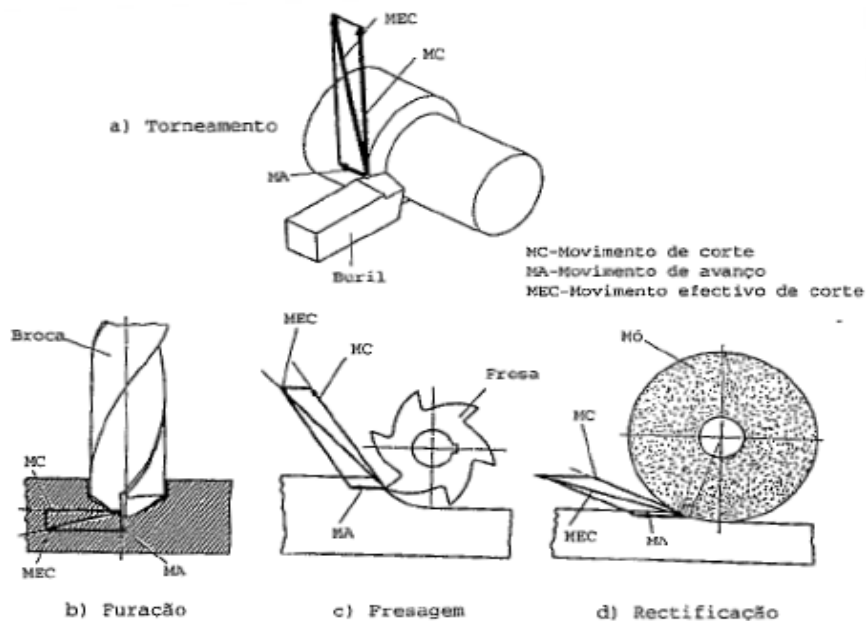


Figura 2 – Principais movimentos de corte que induzem formação de aparas [7].

### 3.2. Critérios para o projecto e construção de ferramentas de corte

O critério mais importante no projecto e construção de ferramentas para corte de madeira e seus derivados é o estabelecimento do balanceamento mais correcto entre a qualidade de corte e a sua fiabilidade.

O corpo da ferramenta e as suas lâminas de corte (*bits*) devem ser definidos tendo em conta as diversas condições de trabalho durante a operação de maquinagem.

A combinação da investigação e da experiência acumulada pela FREZITE ao longo dos anos possibilitou criar um forte conhecimento neste domínio que serve hoje de base ao desenvolvimento de novos projectos de ferramentas de corte para madeira e seus derivados.

As ferramentas devem ser não só flexíveis em termos da sua capacidade de corte nas condições mais adversas de maquinagem, como também devem garantir uma boa e fiável qualidade da superfície de corte.

O desempenho da ferramenta tem um papel muito importante na transformação dos materiais. Os tempos de processamento devem ser minimizados de forma a incrementar a produtividade das instalações.

A fiabilidade de corte ou a qualidade da superfície maquinada, resultante de operações de aplainar ou perfilar, não devem ser sacrificadas em favor da velocidade de processamento.

A qualidade de acabamento, o rigor dimensional, a velocidade de avanço e a durabilidade da ferramenta são largamente influenciados pela geometria de corte escolhida. Desta forma, a posição geométrica dos *bits* e outros factores que influenciam o escoamento da apra devem ser criteriosamente escolhidos.

Os parâmetros geométricos de corte a seguir apresentados (Figura 3) são aplicáveis a todos os sistemas de corte <sup>[1]</sup>.

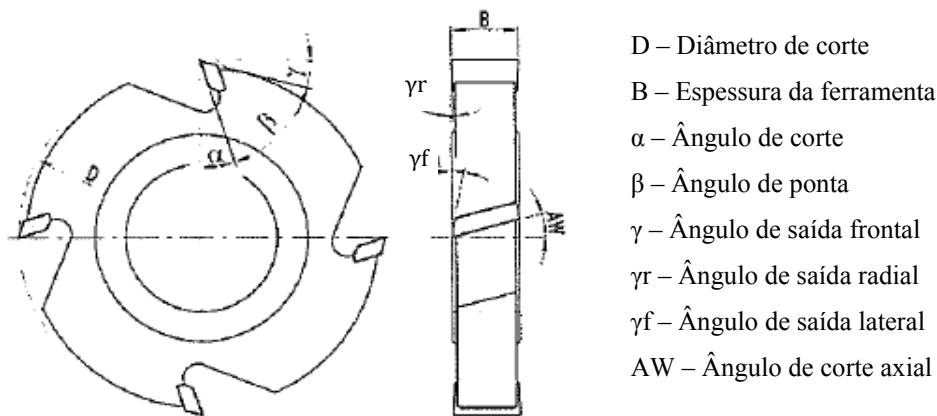


Figura 3 – Parâmetros geométricos que determinam a geometria de corte <sup>[1]</sup>.

### 3.3. Formas de construção de ferramentas

Os *bits* são apenas as arestas de corte, e a sua eficácia está dependente da forma como estes são montados no corpo da ferramenta. Na transformação da madeira, existe uma classificação funcional para as ferramentas <sup>[1]</sup>:

- . Serras circulares;
- . Fresas e porta lâminas para moldurar;
- . Porta lâminas para aplainar;
- . Brocas para furar.

As ferramentas podem ainda ser subdivididas quanto à forma de construção: soldadas, e ferramentas combinadas, tal como esquematizado na figura 4 <sup>[1]</sup>.

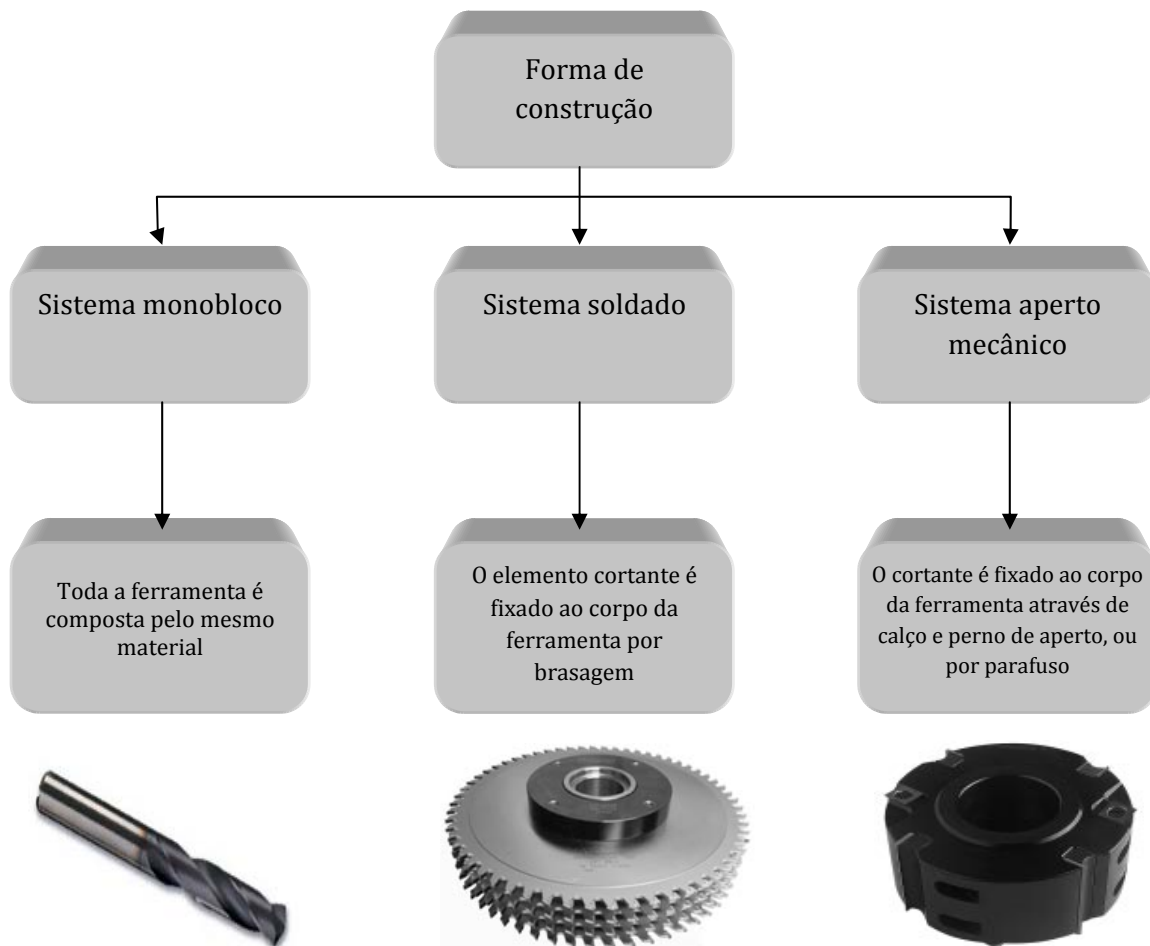


Figura 4 – Tipos de construção de ferramentas de corte<sup>[1]</sup>.

## 4. Ferramentas de corte de diamante policristalino

### 4.1. Introdução

O diamante, material que apresenta maior dureza, era usado primariamente em fábricas de equipamentos para rectificação de rodas de esmeril. Devido ao facto dos diamantes naturais apresentarem um elevado custo, a indústria começou a procurar alternativas mais económicas que oferecessem mais garantias. Em 1954, a *General Electric Company*, depois de quatro anos de pesquisa, produziu nos seus laboratórios diamantes sintéticos monocristalinos. No ano de 1957, a *GE*, depois de mais algumas investigações e testes, iniciou a produção industrial deste tipo de diamantes. O diamante policristalino surgiu mais tarde na década de 70.

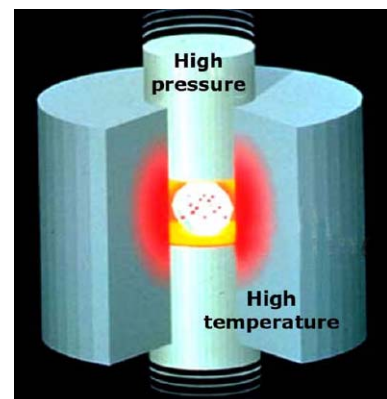


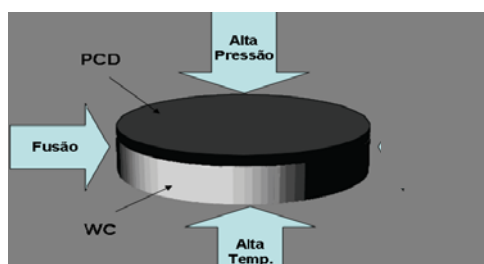
Figura 5 – Esquema representativo do processo HPHT<sup>[6]</sup>.

Para fabricar estes diamantes foram usadas muitas variedades de carbono. Depois de muitos ensaios com diversos materiais, o primeiro sucesso surgiu quando se submeteu, no forno “Belt”, uma mistura de carbono e sulfureto de ferro, contida num tubo de granito fechado com discos de tântalo, a pressões de aproximadamente  $1,5 \times 10^6$  Psi ( $\approx 10,42$  GPa) e temperaturas entre 1400 e 2350°C; este processo viria a ser designado mais tarde por **HPHT** (“*High Pressure/High Temperature*”) (Figura 5) [8].

Torna-se possível produzir diversas configurações de diamante, com tamanho, forma e estrutura cristalina mais adequados para uma aplicação particular, fazendo variar a pressão, a temperatura e o catalisador (crómio, manganês, tântalo, cobalto, níquel ou platina, em vez de ferro). As temperaturas utilizadas têm que ser suficientemente elevadas para promover a fusão do metal saturado em carbono a fim de se dar o crescimento das partículas de diamante [8].

O diamante policristalino é sintetizado geralmente sob a forma de discos, com um diâmetro máximo de 74 mm (o que melhora o rendimento de corte por electroerosão dos discos de PCD em *bits* porque há um menor desperdício de tempo com a troca de discos), usando o processo anteriormente referido (**HPHT**), para valores de temperatura e pressão também já referidos [8], [9], [10].

Uma camada de diamante é depositada, com uma espessura de aproximadamente 0,5 mm, sobre um substrato ou base de metal duro. O substrato é constituído por grãos minúsculos de carboneto de tungsténio ligados entre si por cobalto. A pressão e temperatura elevadas, o cobalto liquidifica, e flui para o topo da pastilha, envolvendo as partículas abrasivas de diamante, servindo de catalisador para o crescimento do tamanho de grão das partículas abrasivas de diamante (Figura 6). Este processo dá origem ao que se denomina *massa policristalina* [8].



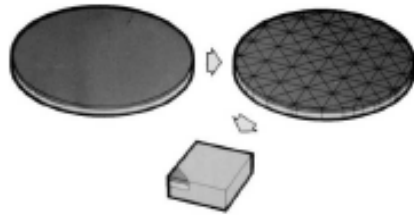
**Figura 6** – Processo HPHT para o fabrico de discos de ferramentas PCD [8].

O diamante policristalino tem uma dureza inferior (40-60 GPa) à do diamante natural (100 GPa).

Na prática existem três tamanhos de grão de PCD disponíveis: fino, médio e grosseiro. O grão fino é ligeiramente menos resistente ao choque que o material de grão grosseiro mas,

contudo, com uma resistência ao desgaste ligeiramente superior. O grão médio corresponde a um compromisso entre os dois anteriores. Espera-se então que um fornecedor de PCD seja capaz de satisfazer os requisitos dos fabricantes de ferramentas de corte<sup>[9]</sup>.

Os PCD's são fornecidos sob a forma de discos que, através de corte por electroerosão, vão dar origem a *bits* que podem ter formas e dimensões variadas (Figura 7). Estas lâminas são posteriormente acopladas a uma base por aperto mecânico ou por brasagem<sup>[8], [9], [10], [11]</sup>.



**Figura 7** – Corte de um disco em *bits*, antes do seu acoplamento ao corpo da ferramenta<sup>[12]</sup>.

No caso das lâminas de corte serem ligadas ao corpo da ferramenta por brasagem, não se pode exceder os 800°C pois o diamante terá tendência a reverter para o seu estado grafitico<sup>[9]</sup>.

Como já foi dito anteriormente, a espessura do diamante policristalino ronda os 0,5 mm. Esta dimensão tem evoluído de forma a ajustar-se ao processo de sintetização do diamante no seu todo, ao processamento dos *bits* e à utilização final da ferramenta, onde o desgaste ou o “*chipping*” da superfície de saída ronda tipicamente os 0,05-0,03 mm de profundidade. Contudo, para ferramentas destinadas a aplicações onde se exigem acabamentos de elevada precisão, poder-se-á utilizar uma camada de PCD mais fina<sup>[13]</sup>.

A espessura da camada de PCD tem efeito sobre o processo de preparação da aresta da ferramenta, quer seja por rectificação mecânica, quer por electroerosão. Anteriormente, para o fabrico de ferramentas para aplicações de acabamento de elevada precisão, onde o processamento da aresta era o factor mais importante a ter em conta (durante o fabrico ou afiamento), utilizava-se, por questões de ordem económica, um produto PCD com elevado teor de metal ou de grão fino. Contudo, tal originava uma ferramenta com uma menor resistência à abrasão e, conseqüentemente, uma durabilidade inferior<sup>[13]</sup>.

O desenvolvimento da tecnologia de produção de camadas de PCD mais finas significa que, hoje em dia, o fabrico de ferramentas pode ser melhorado porque se reduz o volume de material a ser removido, muito embora sem descurar a selecção do PCD mais adequado para uma determinada aplicação, visando a optimização do desempenho da aresta de corte.

O aumento da taxa de corte na operação de afiamento por electroerosão pode traduzir-se numa redução considerável do tempo de maquinagem por electroerosão e, conseqüentemente,

numa redução de custos, mas é preciso ter em conta se a qualidade superficial não é prejudicada de forma significativa <sup>[13]</sup>.

#### **4.2. Tipos e tamanhos de ferramentas de diamante policristalino**

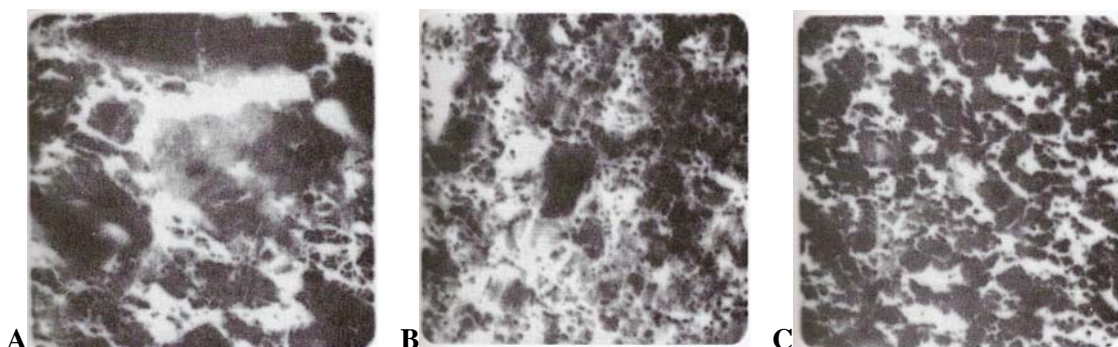
O diamante policristalino ligado por catalisador, que corresponde à variedade mais largamente utilizada, encontra-se disponível em séries de três tipos de microestruturas para diversas aplicações de maquinagem. A diferença básica entre si reside no tamanho das partículas de diamante usadas para fabricar o disco policristalino.

Os fabricantes utilizam nomes comerciais distintos para identificar cada série que, de uma forma geral, é designada de grão fino, médio e grosseiro (Figura 8), tal como referido anteriormente <sup>[8]</sup>.

Os discos de diamante policristalino de grão grosseiro são concebidos para cortar uma grande variedade de materiais abrasivos não ferrosos e não metálicos. São altamente recomendados para maquinar ligas de alumínio usadas em fundição, especialmente aquelas com teores em silício superiores a 16%. As ferramentas de diamante policristalino com este tipo de grãos apresentam geralmente uma durabilidade superior à dos outros tipos.

Por sua vez, os discos de diamante policristalino de grão médio apresentam uma distribuição de tamanho de grão maior que os da série de grão grosseiro. Estas ferramentas são usadas para maquinar materiais não metálicos e não ferrosos altamente abrasivos.

Por último, os discos de diamante policristalino de grão fino têm um tamanho de grão relativamente uniforme. A estrutura de grãos finos permite a produção de ferramentas com arestas de corte extremamente afiadas e a obtenção de acabamentos superficiais de elevada qualidade. Estas ferramentas são recomendadas para aplicações que requerem acabamentos superficiais de boa qualidade e uniformes, e arestas de corte longas <sup>[8]</sup>.



**Figura 8** – Microestruturas das diferentes séries de PCD: - A – Grão grosseiro; B – Grão médio; C – Grão fino <sup>[8]</sup>.

A microestrutura do diamante tem um papel fundamental nas características do disco de diamante policristalino, nas suas aplicações, na resistência ao desgaste, e na vida da ferramenta de corte<sup>[8]</sup>.

#### **4.3. Propriedades das ferramentas de diamante policristalino**

O substrato de metal duro proporciona um excelente suporte mecânico para a camada de diamante policristalino e também ajuda a aumentar a dureza da ferramenta de diamante policristalino acabada. Apresenta uma condutibilidade térmica elevada e um baixo coeficiente de expansão térmica.

As principais características da camada de diamante policristalino são as suas elevadas dureza, resistência à abrasão, resistência à compressão e condutibilidade térmica. A dureza e resistência à abrasão do diamante policristalino resultam da sua estrutura interna. Ao contrário dum diamante natural monocristalino, o cristal de diamante policristalino é uniforme em todas as direcções, não sendo exigida nenhuma orientação especial para otimizar o corte durante as operações de maquinagem.

A camada de diamante apresenta uma resistência à compressão maior que a de qualquer outro material utilizado no fabrico de ferramentas de corte. Tal deve-se à sua estrutura densa que faz com que as ferramentas de corte de diamante policristalino possam suportar as forças criadas pelo choque de operações de corte descontínuas. Por outro lado, a condutibilidade térmica do diamante policristalino é maior que a de qualquer outro material, sendo aproximadamente seis vezes superior à do nitreto de boro cúbico policristalino. Esta elevada condutibilidade térmica permite maiores taxas de dissipação de calor na interface de corte, especialmente na maquinagem de materiais duros e abrasivos a altas velocidades de corte<sup>[8]</sup>.

#### **4.4. Campos de aplicação das ferramentas de corte de diamante policristalino**

O PCD, face ao seu carácter abrasivo, é geralmente usado para maquinar os grupos de materiais indicados na tabela 3.

**Tabela 3** – Campos de aplicação das ferramentas de PCD<sup>[8]</sup>.

| <b>Metais não ferrosos</b>   | <b>Materiais não metálicos</b>  |
|--|---|
| Ligas de alumínio, ligas babbitt, ligas de latão, ligas de bronze, ligas de cobre, ligas de chumbo, ligas de magnésio, prata, platina, carbonetos de tungsténio, ligas de zinco. | Alumina, baquelite, cerâmicos, epoxy, vidro, grafite, macor, borracha dura, compósitos, madeira/derivados de madeira. |

O maior grupo de metais não ferrosos engloba os metais dúcteis, em que alguns deles apresentam partículas duras dispersas na sua matriz. São essas partículas abrasivas duras que destroem a aresta de corte de uma ferramenta convencional. O diamante é mais duro que a partícula abrasiva, conseguindo cortar essa mesma partícula sem destruição da aresta de corte.

Na categoria de materiais não metálicos, inserem-se os compósitos e os cerâmicos, estes últimos de elevada dureza e bastante abrasivos, pelo que a sua maquinagem impõe o recurso ao diamante. As ferramentas de PCD conseguem cortar as inclusões abrasivas duras destes materiais sem o desgaste rápido da aresta de corte<sup>[8]</sup>.

As ferramentas de PCD estão a ser utilizadas, de forma progressiva, na maquinagem de madeira e de seus derivados devido à sua elevada durabilidade, resultante das suas propriedades superiores comparativamente às dos materiais comumente utilizados no fabrico de ferramentas destinadas à maquinagem deste tipo de materiais<sup>[14]</sup>.

Actualmente, os principais materiais usados na maquinagem de madeira e de seus derivados são o aço-rápido, metal duro, cerâmicos, PCD, e PCBN. Cada um destes materiais tem o seu nicho de aplicação mas as propriedades do PCD (elevada dureza, alta condutibilidade térmica, baixo coeficiente de fricção, etc.), aliadas ao facto de se poder com estas ferramentas de corte maquinar com tolerâncias mais apertadas, fazem com que o PCD se apresente como um material ideal para a maquinagem de madeira e de seus derivados<sup>[10] [14]</sup>.

Devido à grande diferença de dureza entre a madeira e o PCD, a ideia não foi originalmente bem aceite. Contudo, quando em 1979, a Lach Diamond Inc. produziu na Alemanha ferramentas de PCD para a maquinagem de madeira, que apresentavam um excelente desempenho (um tempo de vida aproximadamente 125 vezes superior ao do metal duro), foi reconhecido o grande benefício que estas ferramentas podiam trazer para esta área.

Hoje em dia, a população apresenta-se, em geral, mais consciencializada para os problemas ambientais. Muitos países estão a proteger as florestas porque as consideram um bem escasso, com o conseqüente reflexo no desenvolvimento da indústria dos derivados de madeira (MDF's, HDF's, aglomerados de partículas, chão flutuante, etc.). Assim, face à inexistência de materiais mais competitivos para o fabrico de ferramentas de corte que permitam satisfazer os requisitos necessários para a maquinagem destes materiais, o PCD afigura-se cada vez mais como um material para ferramentas para a indústria da madeira e seus derivados<sup>[10]</sup>.

#### **4.5. Tipos de desgaste do diamante policristalino na maquinagem de madeira e de seus derivados**

Um aspecto importante a ter em conta nestas ferramentas, e que carece de estudos mais aprofundados, é a natureza dos tipos de desgaste que estas ferramentas sofrem.

Na bibliografia, os mais referidos para este tipo de ferramentas são a abrasão e o “*chipping*” e a fractura grosseira. Estes mecanismos de desgaste podem ocorrer de forma separada, ou em simultâneo, verificando-se a incidência de mais que um mecanismo de desgaste para uma mesma ferramenta.

No caso do diamante policristalino, são as condições de corte, os materiais a maquinar e os materiais da ferramenta, etc. que irão ditar qual o mecanismo de desgaste dominante [15].

A fractura resulta numa súbita e catastrófica ruptura da ferramenta de PCD, geralmente nas etapas iniciais de corte.

Este tipo de desgaste é consequência da presença de materiais estranhos ao material a maquinar, tais como inclusões duras presentes na madeira, que podem induzir fractura da ferramenta de corte. Após a fractura, a ferramenta de corte é imediatamente removida porque o acabamento superficial do produto revela-se deficiente [14], [16].

Os outros tipos de desgaste são graduais e não levam à destruição imediata da aresta de corte.

O “*chipping*” do PCD (Figura 9) pode ocorrer ao maquinar materiais duros com taxas de avanço elevadas, por exemplo superiores a 0,4 mm/dente (serra circular); pode também resultar de uma deficiente extracção da aparas.

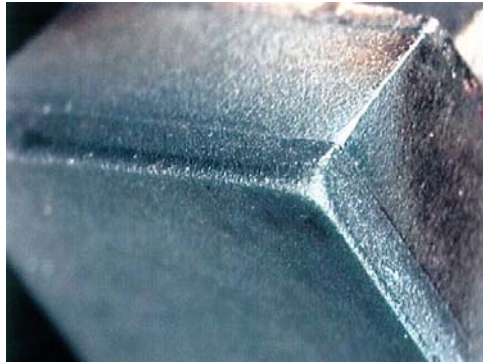
Ocorre num dado local da aresta de corte em que se atingiram valores superiores ao da resistência à fractura do material da ferramenta de corte. Estudos efectuados mostram que este fenómeno ocorre essencialmente na maquinagem de derivados de madeira não-homogéneos [14].



**Figura 9** – “*Chipping*” de um *bit* numa broca de PCD utilizada no corte de piso flutuante.

O PCD de grão fino é menos susceptível a este tipo de fenômenos na aresta de corte. O grau de “*chipping*”, que determina a vida da ferramenta, poderá ser maior ou menor, dependendo da qualidade de acabamento superficial exigida<sup>[17]</sup>.

Por sua vez, o desgaste abrasivo (Figura 10) ocorre quando a aresta de corte se desgasta de forma uniforme. Admite-se que este tipo de desgaste ocorra essencialmente na maquinagem de derivados de madeira homogêneos.



**Figura 10** – Desgaste abrasivo de um dente duma serra de PCD utilizada para cortar contraplacado.

A área de desgaste aumentará de forma progressiva com a quantidade de produto maquinado até o momento em que a ferramenta já não corta de maneira eficaz ou não permite obter o grau de acabamento superficial desejado<sup>[14]</sup>.

O desgaste abrasivo das arestas de corte secundárias pode causar uma diminuição do tempo de vida da ferramenta bem como a deterioração da qualidade de corte. Para evitar este tipo de desgaste, é possível erodir lateralmente no ângulo de saída. Contudo, esta operação acarreta um aumento dos custos de afiamento e uma perda da largura de corte.

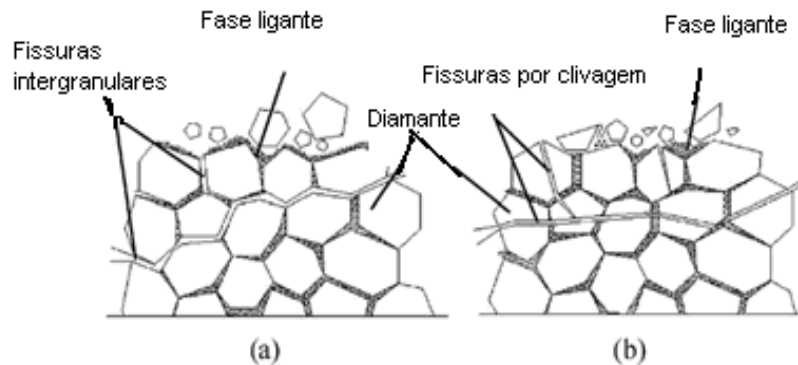
A remoção contínua da resina dos lados dos *bits*, ao longo da operação de corte de chão flutuante, permite reduzir a perda de material da superfície de saída da ferramenta de corte, aumentando conseqüentemente a sua durabilidade.

A área de desgaste ronda aproximadamente os 0,2 a 0,3 mm, valor de desgaste normal sofrido por uma ferramenta de corte de diamante policristalino, pelo que será esta a espessura de material a retirar aquando do afiamento.

Estudos recentes sobre o desgaste das ferramentas de PCD na maquinagem de madeira levam a supor que os mecanismos de desgaste surgem na sequência do aparecimento de micro-fissuras. Assume-se que estas fissuras ocorrem devido a factores extrínsecos à ferramenta (condições de corte, etc.), que potenciam a ruptura por clivagem dentro dos grãos do diamante policristalino, enfraquecendo a aresta de corte e induzindo o seu desgaste<sup>[14], [17]</sup>.

Por último, de referir que já foi sugerido outro tipo de mecanismo de desgaste para o PCD: o desgaste por ruptura intergranular<sup>[17]</sup>.

A figura seguinte representa, de forma esquemática, os mecanismos de desgaste por ruptura por clivagem e por ruptura intergranular, apontados por Bai et al.<sup>[17]</sup>, num dos seus estudos sobre os mecanismos de desgaste do PCD no corte de chãos flutuantes revestidos com  $Al_2O_3$ <sup>[17]</sup>.



**Figura 11** – Modos de desgaste durante o corte de piso flutuante:  
(a) ruptura intergranular; (b) ruptura por clivagem<sup>[17]</sup>.

A natureza exacta do desgaste do PCD na maquinagem de derivados de madeira ainda não foi totalmente estabelecida<sup>[14]</sup>.

#### **4.6. Vantagens das ferramentas de corte de diamante policristalino**

As vantagens que este tipo de ferramentas oferece à indústria ultrapassam largamente o seu elevado custo. Primariamente usadas para maquinar materiais não ferrosos e não metálicos, estas ferramentas são capazes de melhorar substancialmente a eficácia de corte, a redução de não-conformidades e a qualidade do produto. Podem-se enumerar algumas das principais vantagens deste tipo de ferramentas<sup>[8]</sup>:

- vida de ferramenta longa;
- cortes de material duro e abrasivo;
- produção de componentes de alta qualidade;
- graus de acabamento superficial finos;
- diminuição do tempo de inactividade da máquina;
- aumento de produtividade.

## 5. Rugosidade Superficial

A rugosidade é uma medida que permite aferir a qualidade duma dada superfície. É quantificada através das diferenças entre os picos e vales duma superfície real para uma superfície ideal. Se estas diferenças forem grandes, a superfície é rugosa; se forem pequenas, a superfície é macia <sup>[18], [19]</sup>.

A rugosidade tem um papel importante na previsão do modo como um dado objecto vai interagir num determinado ambiente. Superfícies rugosas desgastam-se normalmente de forma mais rápida e apresentam coeficientes de atrito mais elevados do que as superfícies mais macias. A rugosidade é normalmente um bom indicador para o desempenho dum componente mecânico já que irregularidades na superfície podem originar locais de nucleação de fissuras ou de corrosão.

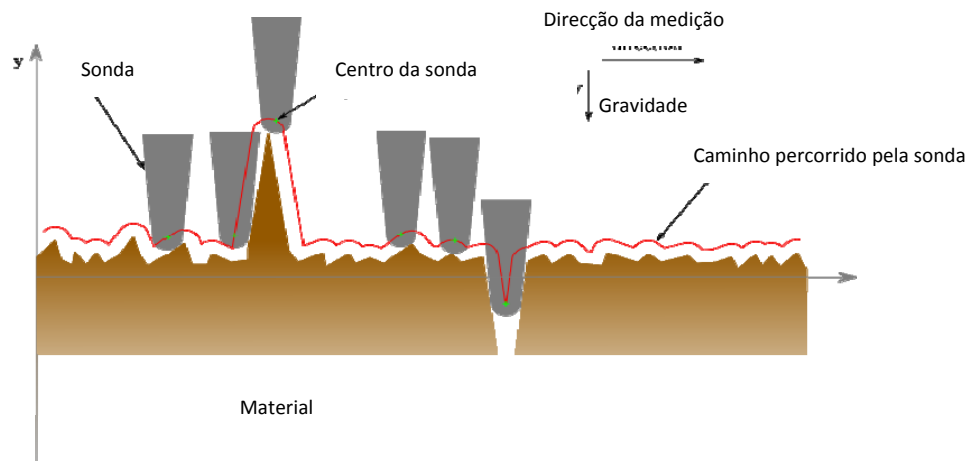
Apesar da rugosidade ser vulgarmente indesejada em ferramentas de corte, torna-se extraordinariamente difícil e dispendioso controlá-la durante o processo de fabrico. Diminuir a rugosidade duma superfície aumenta normalmente, de forma exponencial, os custos de fabrico. Isto faz com que seja necessário estabelecer um compromisso entre o custo de fabrico dum componente e o seu desempenho para uma dada aplicação <sup>[18], [19]</sup>.

O estado em que se encontra uma superfície maquinada é o resultado de um processo complexo envolvendo deformação plástica, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e, por vezes, reacções químicas. A rugosidade de uma superfície maquinada é o resultado da combinação de alguns factores tais como as condições de corte, geometria da ferramenta, geometria da peça, rigidez da máquina ferramenta, material da peça a maquinar e da ferramenta <sup>[20]</sup>.

As condições de corte, principalmente o avanço e a velocidade de corte, têm grande influência na rugosidade superficial. Velocidades de corte muito baixas podem favorecer o aparecimento de BUE (*“Built-up-edge”*), que é altamente prejudicial em termos de acabamento superficial. Por sua vez, as diferenças de altura entre os picos e vales das marcas de avanço vêm incrementadas à medida que se aumenta a velocidade de avanço <sup>[20]</sup>.

### 5.1. Medição

A rugosidade pode ser determinada recorrendo a métodos de contacto ou de não-contacto. Os métodos de contacto envolvem uma sonda que é arrastada ao longo da superfície (Figura 12); estes incluem os perfilómetros. Os métodos de não-contacto incluem a interferometria, a microscopia confocal e a microscopia electrónica de varrimento <sup>[18], [19]</sup>.



**Figura 12** – Esquema representativo duma sonda a efectuar o varrimento duma superfície <sup>[19]</sup>.

Para medições 2D, a sonda traça geralmente uma linha recta numa superfície plana, ou um arco numa superfície cilíndrica. O comprimento do caminho traçado é denominado de caminho de medição. O comprimento de onda do filtro da frequência mais baixa que vai ser utilizada para analisar os dados é definido como comprimento de amostragem <sup>[18], [19]</sup>.

Para medições 3D, a sonda é comandada de forma a fazer um varrimento sobre uma área 2D na superfície. O espaçamento entre os pontos adquiridos pode não ser o mesmo nas duas direcções.

Em alguns casos, a geometria do instrumento de medição poderá ter um efeito significativo nos valores obtidos, sobretudo no caso da medição de superfícies muito macias. Para medições com contacto, o problema mais óbvio será a sonda riscar a superfície a ser medida por remoção de material da superfície, especialmente se forem efectuadas várias medições na mesma zona. Neste caso, a sonda é um filtro físico que limita a precisão do instrumento <sup>[18], [19], [21]</sup>.

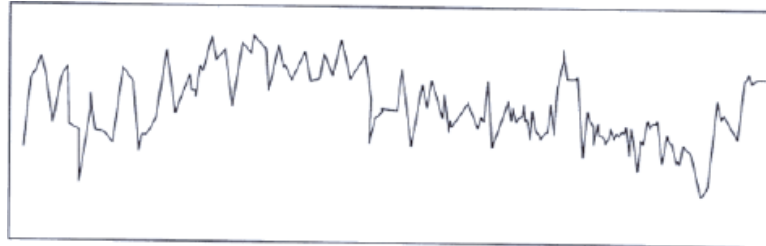
Os métodos de não contacto apresentam igualmente limitações. Por exemplo, instrumentos que dependem de interferência óptica não conseguem resolver detalhes que sejam menores do que uma dada fracção da frequência do comprimento de onda a que estão a operar. Esta limitação pode tornar complicada a medição de forma precisa da rugosidade, mesmo em objectos comuns, devido a alguns detalhes apresentarem dimensões bem abaixo do comprimento de onda da luz <sup>[18], [19]</sup>.

## **5.2. Análise da qualidade superficial**

O primeiro passo na análise da rugosidade é usualmente filtrar a medição de modo a remover dados com frequências altas que podem ser atribuídos a pequenas vibrações ou impurezas presentes na superfície. De seguida, os dados são separados em rugosidade,

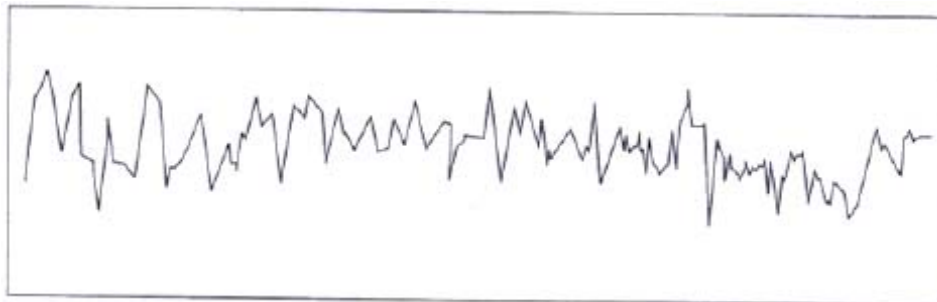
ondulação e forma. Isto pode ser alcançado usando linhas de referência, métodos de envelope, filtros digitais, etc. Finalmente, os dados são sumarizados usando um ou mais parâmetros de rugosidade, ou então um gráfico <sup>[18], [19]</sup>.

Para a obtenção de um perfil torna-se necessário realizar uma amostragem, tacteando um dado comprimento da superfície em causa. É possível construir um perfil efectivo (Figura 13) medindo em sucessivos pontos percorridos o desvio sofrido na direcção normal pela ponta da sonda <sup>[7]</sup>.



**Figura 13** – Perfil efectivo obtido a partir dum rugosímetro (sem filtragem) <sup>[22]</sup>.

A partir deste perfil efectivo pode-se obter o perfil de rugosidade (Figura 14), através de filtragens eléctricas adequadas para eliminar a ondulação que geralmente se sobrepõe à rugosidade <sup>[7]</sup>.



**Figura 14** – Perfil de rugosidade (com filtragem) <sup>[22]</sup>.

Anteriormente, o acabamento superficial era normalmente analisado à mão, isto é, o equipamento de medição fornecia os dados sob a forma dum gráfico de rugosidade em papel. De seguida, estes dados eram analisados por um operador experiente que decidia quais os dados a ignorar e como representar a linha média.

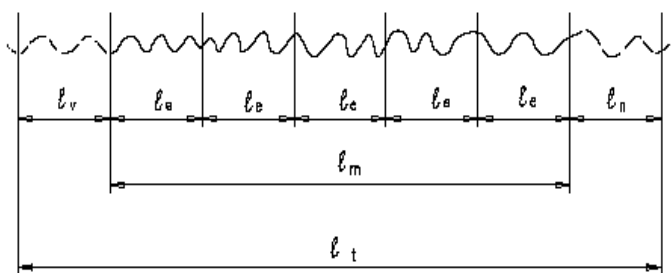
Hoje em dia, os valores das medições são armazenados em suporte informático e analisados usando métodos estatísticos e analíticos <sup>[18], [19]</sup>.

### **5.2.1. Critérios para avaliar a rugosidade**

Na figura 15 explicitam-se, de forma gráfica, os conceitos de comprimento de amostragem ( $l_e$ ), comprimento de medição ( $l_m$ ) e comprimento total de medição ( $l_t$ ) que são imprescindíveis no cálculo dos parâmetros que quantificam a rugosidade da superfície. Os

valores obtidos para o comprimento para atingir a velocidade de medição ( $l_v$ ) e para o último comprimento efectuado pelo apalpador ( $l_n$ ) não são utilizados para efeito de cálculo de parâmetros porque estão associados à fase de aceleração e de desaceleração do dispositivo de medição, o que pode introduzir erros na operação. O comprimento de amostragem ( $l_e$ ) ou “Cut-Off” está normalizado, aplicando-se os valores de 0,08/0,25/0,8/2,5/8,0/25,0 mm consoante a rugosidade da superfície a medir [7], [22].

Como o perfil efectivo apresenta rugosidade e ondulação, o  $l_e$  filtra a ondulação. A norma ISO recomenda a medição de 5 comprimentos de amostragem ( $l_m = 5l_e$ ), com indicação do valor médio [7], [22].



$l_m$ : comprimento do percurso de medição;

$l_t$ : comprimento total de medição;

$l_v$ : comprimento para atingir a velocidade de medição;

$l_n$ : último comprimento medido pelo apalpador.

**Figura 15** – Representação esquemática dos diversos comprimentos de medição utilizados na determinação da rugosidade [22].

Na medição da rugosidade, são recomendados valores para o comprimento da amostragem, tais como os apresentados na tabela 4.

**Tabela 4** – Comprimento da amostragem (“Cut-Off”) [22].

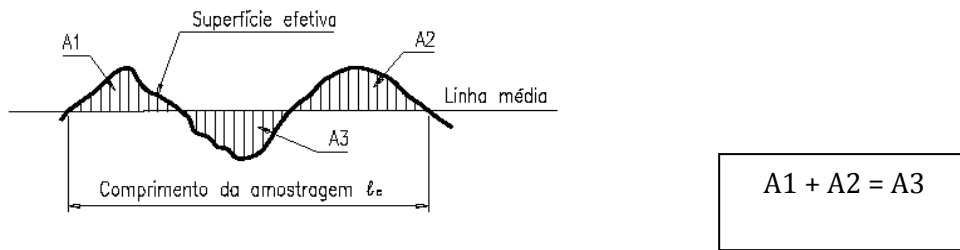
| RUGOSIDADE MÉDIA (RA)<br>( $\mu\text{m}$ ) | COMPRIMENTO MÍNIMO DE AMOSTRAGEM I<br>(CUT-OFF)<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|--|--|
| $0 \leq Ra \leq 0,1$                       | 0,25   |
| $0,1 < Ra \leq 2,0$                        | 0,80   |
| $2,0 < Ra \leq 10,0$                       | 2,50   |
| $Ra > 10,0$                                | 8,00   |

### 5.2.2. Sistemas de medição da rugosidade superficial

É utilizado um sistema básico de medição: o da linha média M (Figura 16). Existem outros sistemas mas o da linha média é o mais utilizado.

No sistema da linha média, ou sistema M, todas as grandezas da medição da rugosidade são definidas a partir do conceito de linha média. A linha média é a linha paralela à direcção geral do perfil, no comprimento da amostragem ( $l_e$ ), de tal modo que a soma das áreas

superiores, compreendidas entre essa linha média e o perfil efectivo, seja igual à soma das áreas inferiores [7], [22].



A1 e A2 áreas acima da linha média = A3 área abaixo da linha média.

**Figura 16** – Definição esquemática de linha média [22].

### 5.3. Parâmetros de amplitude de rugosidade

Cada parâmetro de rugosidade é calculado utilizando uma fórmula para descrever a superfície.

Existem muitos e variados parâmetros de rugosidade, mas o da rugosidade média ( $R_a$ ) é de longe o mais utilizado. Outros parâmetros comuns são a profundidade média de rugosidade ( $R_z$ ), rugosidade total ( $R_t$ ), etc. [18], [19], [22].

Como estes parâmetros reduzem a um número único toda a informação dum perfil duma determinada superfície, é preciso ter muito cuidado na aplicação e na interpretação dos mesmos. Pequenas alterações na filtragem dos dados do perfil da superfície no cálculo da linha média, ou no modo como se efectua a medição, podem afectar de forma significativa o parâmetro calculado [18], [19].

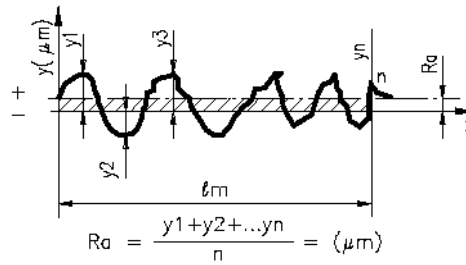
Por convenção, qualquer parâmetro de rugosidade 2D é designado por um R maiúsculo, seguido de um outro caracter em expoente que identifica a fórmula utilizada. A utilização de letras maiúsculas distintas significa que a fórmula foi aplicada para um perfil diferente. Por exemplo,  $R_a$  é a média aritmética dum perfil de rugosidade,  $P_a$  é a média aritmética para um perfil de rugosidade não filtrado e  $S_a$  é a média aritmética para um perfil de rugosidade 3D.

As fórmulas dos parâmetros de amplitude a seguir listadas assumem que o perfil de rugosidade foi filtrado a partir dos dados iniciais e que a linha média foi calculada [18], [19].

#### 5.3.1. Rugosidade média ( $R_a$ )

É o parâmetro mais utilizado e corresponde à média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento ( $y_i$ ) dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição ( $l_m$ ) (Figura 17). Essa grandeza pode corresponder à altura de

um rectângulo cuja área é igual à soma das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição ( $l_m$ )<sup>[22]</sup>.



**Figura 17** – Determinação do parâmetro Ra<sup>[22]</sup>.

Tal como referido anteriormente, é preciso ter muito cuidado na aplicação e na interpretação dos parâmetros porque reduzem a informação dum perfil duma superfície a um número único. Tal é demonstrado na figura 18: os perfis apresentam o mesmo valor de Ra, mas a simples observação visual permite concluir que os resultados práticos podem ser bastante diferentes, dependendo da aplicação<sup>[18], [19], [22]</sup>.



**Figura 18** – Diferentes perfis de rugosidade para um mesmo valor de Ra<sup>[23]</sup>.

Caso haja necessidade de uma especificação mais rigorosa, outros parâmetros devem ser considerados, tais como picos e depressões, formas, espaçamentos, pelo que devem ser considerados métodos mais sofisticados<sup>[23]</sup>.

Apresenta como vantagens o facto de ser o parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo, sendo aplicável na maioria dos processos de fabricação. Praticamente todos os equipamentos do género apresentam esse parâmetro (analógicos e digitais). Os riscos superficiais inerentes ao processo não alteram muito o seu valor para a maioria das superfícies.

As desvantagens são que o valor de Ra indica, num comprimento de amostragem, a média da rugosidade. Por isso, se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando o defeito. O valor de Ra não define a forma das irregularidades do perfil; nenhuma distinção é estabelecida entre picos e vales. Para alguns processos de fabricação, com uma frequência muito alta de vales ou picos, o parâmetro não é adequado já que a distorção provocada pelo filtro eleva o erro a níveis mais elevados.

### 5.3.2. Rugosidade máxima (Ry)

Está definida como o maior valor das rugosidades parciais ( $Z_i$ ) que se apresenta no percurso de medição ( $l_m$ ). Por exemplo: na figura 19, o valor parcial mais elevado é  $Z_3$ , que está localizado no 3º “Cut-Off”, e que corresponde à rugosidade  $R_y$ .

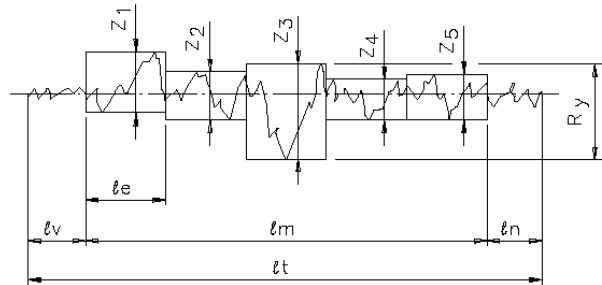


Figura 19 – Determinação do parâmetro  $R_y$ <sup>[22]</sup>.

Individualmente o  $R_y$  não fornece informação suficiente a respeito da superfície, isto é, não informa sobre a textura duma dada superfície. A figura 20 ilustra esta ideia: diversas formas de rugosidade podem apresentar o mesmo valor para  $R_y$ .

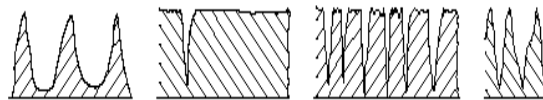


Figura 20 – Diversas formas de rugosidade para um mesmo valor de  $R_y$ <sup>[22]</sup>.

### 5.3.3. Rugosidade total (Rt)

Corresponde à distância, na vertical, entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação ( $l_m$ ), independentemente dos valores de rugosidade parcial ( $Z_i$ ) (Figura 21).

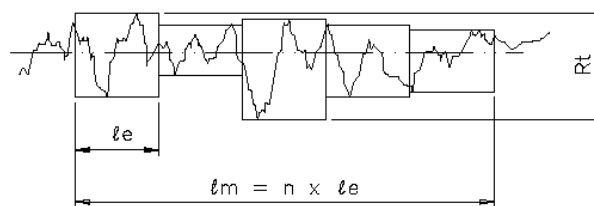


Figura 21 – Determinação do parâmetro  $R_t$ <sup>[22]</sup>.

### 5.3.4. Profundidade média de rugosidade (Rz)

Corresponde à média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial ( $Z_i$ ). A rugosidade parcial ( $Z_i$ ) é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de amostragem (Cut-Off). Na

representação gráfica do perfil, esse valor corresponde à altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, no comprimento de amostragem ( $\ell_e$ ) (Figura 22) [22].

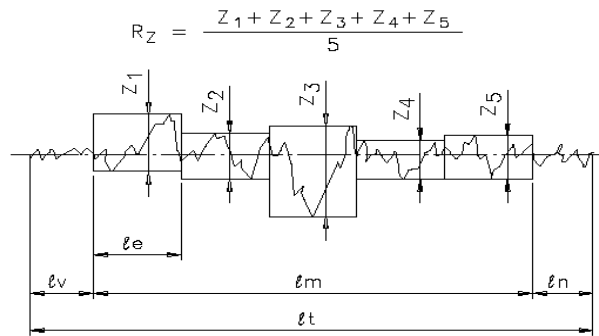


Figura 22 – Determinação do parâmetro  $R_z$  [22].

## 6. Electroerosão

É um processo usado para remover material através da acção duma descarga eléctrica de curta duração, e alta densidade de corrente, entre a mó ou fio de corte e o material da peça que está a ser maquinada. Este princípio já é conhecido há muito tempo. Em 1889, Paschen explicou o fenómeno e deduziu uma fórmula para prever o efeito deste princípio em diferentes materiais. Este processo pode ser comparado a uma versão miniatura dum relâmpago a atingir uma superfície, gerando, duma forma localizada, temperaturas elevadas e fundindo a superfície de trabalho [8].

A electroerosão tem assumido um papel relevante em diferentes áreas de produção do sector metalomecânico, nomeadamente em aplicações que utilizam materiais difíceis de maquinar (elevada dureza) e nas situações em que o detalhe do pormenor torna impraticável o corte por arranque de apara, torneamento, fresagem ou por qualquer outro processo [7]. [8].

O maior campo de aplicação da electroerosão é actualmente a indústria de moldes e de ferramentas, particularmente no fabrico de feiras de extrusoras, matrizes de forjamento e moldes de injeção de plásticos. A grande vantagem deste processo reside no facto dos materiais metálicos poderem ser maquinados mesmo após endurecimento resultante de qualquer tratamento térmico ou termoquímico, conseguindo-se obter uma elevada precisão dimensional. Permite ainda a obtenção de superfícies e perfis, curvos ou direitos, interiores ou exteriores, com ou sem saída, mesmo quando apresentam arestas vivas. Por outro lado, a quase ausência de deformação ou fissuras à superfície reduz a probabilidade de falhas por fadiga na presença de solicitações dinâmicas [7]. [8].

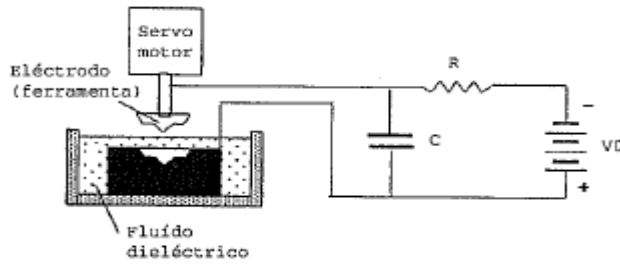
Em relação ao grau de acabamento superficial obtido, pode-se afirmar, de forma sintética, que cada faísca individual funde e depois vaporiza uma pequena quantidade do material da

superfície da peça que está a ser maquinada, originando uma cratera. Isto verifica-se nas diferentes operações de electroerosão existentes. Uma potência elevada e uma duração de faísca longa (frequências baixas) originam taxas de remoção de material elevadas e superfícies mais rugosas. Em contrapartida, a combinação de potências baixas e durações de faísca curtas (frequências elevadas) resultam em acabamentos superficiais de melhor qualidade<sup>[24]</sup>.

As maiores limitações da electroerosão traduzem-se no facto de ser um processo de baixo rendimento (taxas de remoção de material diminutas), de o material a ser maquinado ter que ser electricamente condutor e de as peças obtidas apresentarem, por vezes, um acabamento superficial deficiente – superfície granitada. Contudo, é possível obter um bom acabamento superficial, muito embora à custa de um aumento do tempo de trabalho, o que geralmente não é económico, sendo o acabamento final feito, quando necessário, por outro processo. Podem surgir dificuldades em conseguir efectuar a electroerosão em materiais com elevada condutibilidade térmica, como é, por exemplo, o caso do cobre<sup>[7], [8]</sup>.

### **6.1. Princípio físico da electroerosão**

Há muito que se verificou que uma descarga eléctrica produz arranque de material nas peças ou eléctrodos entre as quais se dá essa descarga. Este efeito nota-se quer no ânodo (-) quer no cátodo (+). A electroerosão baseia-se neste fenómeno utilizando uma corrente de elevada frequência (20000 Hz). Estes impulsos eléctricos vaporizam o fluido dieléctrico permitindo a descarga da faísca entre o eléctrodo e o material a maquinar através do fluido dieléctrico, fundindo o material, sendo removidas da superfície pequenas partículas de material. O fluido dieléctrico, que está sempre em circulação, possibilita a remoção destas partículas, dissipando também o calor resultante da descarga. O sistema típico é constituído por um circuito RC, no qual a corrente passa através de uma resistência, carregando um condensador a uma tensão da ordem dos 40 a 400 V. A figura 23 representa, de forma simplista, o esquema eléctrico associado ao processo. A folga típica entre eléctrodo e a peça é de 0,025 a 0,05 mm e a taxa de remoção de material é da ordem dos 300 mm<sup>3</sup>/min, para uma potência específica de 10 W/mm<sup>3</sup>/min<sup>[7], [8]</sup>.



**Figura 23** – Esquema representativo do circuito eléctrico de um sistema de electroerosão [7].

Neste circuito, quando o gradiente de tensão entre o eléctrodo e a peça atinge um valor crítico, gera-se uma corrente eléctrica através do fluido dieléctrico, ionizando-o. Como o fluido dieléctrico ionizado é bom condutor, obtém-se uma densidade de corrente elevada que origina a formação de um plasma.

Atingindo-se um valor crítico de tensão ( $V_s$ ), ocorre a descarga do condensador num curtíssimo intervalo de tempo, tipicamente a rondar  $1 \mu s$ , produzindo uma subida de temperatura, que pode atingir valores da ordem de  $10000-12000 \text{ }^\circ C$ . Com esta elevação de temperatura, ocorrem, geralmente, dois fenómenos: a fusão e a vaporização do material [7].

Dada a rapidez com que se efectua a descarga, a zona do material que é atingida fica confinada a uma camada muito fina, junto da superfície. Em consequência da descarga, gera-se uma onda de pressão que atinge a superfície do material e que facilita, por acção mecânica, a remoção do material fundido, deixando uma cratera razoavelmente plana e lisa.

Não é fácil de determinar analiticamente o volume de material removido em cada descarga. No entanto, sabe-se, de uma forma empírica, que depende da duração e da energia libertada em cada descarga. Também é sabido que, quanto maior for a taxa de remoção, pior é o acabamento superficial. Tem-se verificado, experimentalmente, que pode atingir-se um bom compromisso entre a taxa de remoção de material e o grau de acabamento superficial quando se utilizam valores de  $0,009 \text{ mm}^3/s$ , para uma duração de faísca de  $10$  a  $20 \mu s$  [7].

A superfície obtida por electroerosão é, morfológicamente, quase lisa, mas com um brilho mate devido à concentração de pequenas crateras resultantes das descargas eléctricas. Porém, utilizando taxas de remoção de material reduzidas, ou descargas de menor energia, é possível obter superfícies com rugosidade  $R_t \sim 2 \mu m$ . Para taxas de remoção elevadas, aplica-se uma descarga de maior energia, o que promove uma superfície com crateras maiores no material maquinado e, conseqüentemente, uma superfície mais rugosa, mas, por outro lado, minimizam-se os tempos de produção. Porém, isto implica o aumento da espessura de material que, devido à elevação de temperatura, é alterado ou degradado, podendo constituir um grave inconveniente em termos da funcionalidade da peça. Por outro lado, embora a remoção de material ocorra preferencialmente no ânodo (peça), o cátodo (ferramenta),

normalmente designado por eléctrodo, também sofre desgaste, tornando-se necessário promover uma compensação no seu avanço. Esta compensação deverá ser tanto maior quanto maior for a energia transmitida pela descarga. Todos estes factores devem ser ajustados pelo método de tentativa e erro [7], [8], [24].

## **6.2. Factores que influenciam a electroerosão**

Tal como analisado na secção precedente, a influência dos factores eléctricos é determinante na maquinagem de metais por electroerosão. No entanto, outros factores são igualmente importantes, nomeadamente as características dos eléctrodos (ferramentas) e do fluido dieléctrico.

Os eléctrodos têm influência sobre a velocidade de corte e sobre o grau de acabamento superficial obtido. Tal como visto, o arranque de material por electroerosão é baseado num processo térmico causado por uma descarga eléctrica. Logo, são as propriedades térmicas dos materiais em presença, e não as suas propriedades mecânicas, que determinam a eficácia da operação para o grau de acabamento da superfície obtido. Assim, por exemplo, na electroerosão de um aço tratado termicamente (mais fácil de maquinar que um aço macio), e para condições de regulação determinadas, um eléctrodo em latão confere uma amplitude máxima da rugosidade ( $R_t$ )  $\sim 6 \mu\text{m}$ , enquanto que um eléctrodo em Cobre-grafite permite um trabalho mais rápido, aumentando o  $R_t$  para os  $8 \mu\text{m}$  [7].

## **6.3. Fluido dieléctrico**

O fluido dieléctrico tem igualmente um papel importante, desempenhando várias funções principais [8]:

1. serve de isolante entre o eléctrodo e a peça de trabalho, até se atingir a voltagem requerida;
2. vaporiza (ioniza) para iniciar a faísca entre o eléctrodo e a peça de trabalho;
3. confina o caminho da faísca a um canal estreito;
4. remove as partículas metálicas, resultantes da operação, para evitar curto-circuitos;
5. actua como agente de refrigeração do eléctrodo e da peça de trabalho.

Utilizam-se como fluidos dieléctricos petróleo, óleo de transformador, ou óleo mineral, e também, em casos especiais, a água, muito embora esta tenha tendência a reduzir o rendimento da operação. Há que ter igualmente em consideração a decomposição do fluido dieléctrico em consequência das descargas repetidas e a poluição provocada pelos produtos desta decomposição, assim como as micropartículas arrancadas dos eléctrodos [7], [8].

#### **6.4. Electroerosão do diamante policristalino**

A introdução do diamante policristalino num substrato de metal duro (WC) promove de forma significativa a eficácia do corte do PCD. Além do cobalto presente actuar como ligante e como catalisador do crescimento das partículas de diamante, é a sua condutividade eléctrica que permite ao PCD ser maquinado por electroerosão. Quando o PCD está a ser maquinado por este processo, o cobalto (material condutor) é erodido em primeiro lugar. A elevada temperatura então atingida induz a transformação do diamante da superfície em grafite (electricamente condutora), e é esta camada de grafite que facilita a erosão do diamante [25], [26].

A electroerosão deste material, à semelhança do metal duro, é mais lenta que a do aço. A velocidade de corte depende do teor de cobalto que foi sinterizado com os cristais de diamante e do tamanho das partículas de PCD. Partículas grandes de PCD requerem uma tensão de impulsos mais elevada para se conseguir efectuar o seu corte. Também é de referir que algumas máquinas cortam o PCD melhor que outras devido à diferença de potência do gerador [25], [26].

### **7. Avaliação do desempenho de ferramentas de diamante policristalino na maquinagem de piso flutuante com diamante fornecido por dois fornecedores diferentes.**

Tal como já descrito inicialmente, procedeu-se à avaliação do desempenho de ferramentas de diamante policristalino de dois fornecedores diferentes (**ELEMENT SIX** e **ILJIN**) na maquinagem de piso flutuante.

Na FREZITE, o PCD utilizado para quase todas as aplicações de maquinagem de madeira e seus derivados é o de grão de 10 µm visto constituir um grau intermédio, em termos de resistência ao desgaste e de acabamento superficial, oferecendo melhores resultados de operação. De uma forma geral, só se varia o tipo de PCD caso o de grão médio se manifeste insatisfatório ou caso se saiba de antemão que outro grau de PCD é mais adequado para uma determinada aplicação. O PCD de grão médio mais utilizado na FREZITE é o CTB010 da ELEMENT SIX.

A avaliação do desempenho das ferramentas em análise foi então dividida em duas partes (Tabela 5), tomando sempre por base quatro termos de comparação:

**Tabela 5** – Esquema representativo dos testes comparativos do desempenho das ferramentas de corte de diamante policristalino.

| I  | II                      |
|--|-------------------------|
| <b>CTB010 vs CMW</b>   | <b>CTH025 vs CLX-II</b> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Observação da microestrutura do diamante policristalino;</b></li> <li>- <b>Tempo de afiamento da ferramenta;</b></li> <li>- <b>Qualidade da superfície da ferramenta após afiamento por electroerosão (análise de rugosidades);</b></li> <li>- <b>Metros lineares cortados.</b></li> </ul> |                         |

Na parte I, o desempenho do CTB010, da ELEMENT SIX, foi então comparado com um PCD, com o mesmo tamanho de grão (10 µm), da ILJIN, o CMW.

Na parte II, comparou-se o desempenho em serviço de dois PCD's de grão mais grosseiro, o CTH025 (25 µm) da ELEMENT SIX e o CLX-II (40 µm) da ILJIN. Para esta aplicação específica de maquinagem de piso flutuante, a FREZITE utiliza geralmente o CTH025, um PCD mais resistente ao desgaste que o CTB010. Contudo, como se tratava da maquinagem de um tipo de piso flutuante muito abrasivo, surgiu a ideia de comparar o CTH025 com o CLX-II que apresenta um tamanho de grão maior, pelo que, em teoria, apresentaria uma resistência ao desgaste ainda mais elevada<sup>[8]</sup>. É de referir que a ILJIN é actualmente a única empresa que produz um PCD com grão destas dimensões.

Para atingir este fim foi inicialmente proposto fazer quatro ferramentas novas, uma com cada tipo de PCD anteriormente referido. Contudo, devido aos elevados custos associados ao fabrico duma ferramenta de corte nova deste tipo, foi sugerido fabricar apenas duas ferramentas novas com o diamante da ILJIN (CMW e CLX-II), e comparar o seu desempenho com ferramentas com diamante da ELEMENT SIX que já estivessem a trabalhar visto que praticamente todas as ferramentas da FREZITE são produzidas com diamante da ELEMENT SIX.

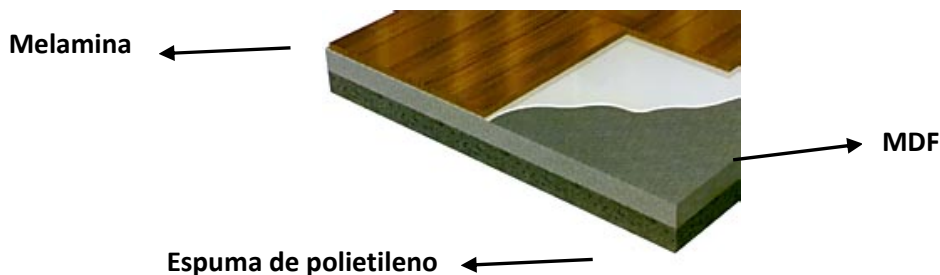
### **7.1. Piso Flutuante**

A produção de pavimentos laminados nasceu há aproximadamente duas décadas na Suécia. O objectivo era fabricar um sistema de revestimento leve, durável e mais fácil de manter que os revestimentos utilizados até então (carpete, madeira, PVC, cortiça).

Os pisos laminados apresentam um revestimento constituído por uma camada superficial consistente, formado por uma ou mais lâminas finas de um material fibroso (normalmente papel), impregnado com resinas aminoplásticas, termo-endurecíveis (normalmente melaminas).

As lâminas são prensadas, a quente, em conjunto, e coladas, com colas de melamina, sobre um substrato de painel de fibras de densidade média (MDF), de fibras de alta densidade (HDF), ou ainda de painéis aglomerados também de alta densidade (Figura 24).

O conjunto assim formado vai-se encaixando em todo o seu perímetro, pousando como piso flutuante, isto é, sem qualquer sistema de fixação ao suporte, apoiado unicamente sobre uma espuma de polietileno de 2 ou 3 mm de espessura. Os laminados são colados entre si, em toda a área, embora tenham surgido no mercado sistemas de encaixe autoblocantes que não implicam a utilização de qualquer tipo de adesivo.



**Figura 24** – Esquema representativo dum pavimento laminado (piso flutuante).

As propriedades combinadas do piso flutuante, tais como elevada dureza, boa resistência ao desgaste e à humidade, facilidade de instalação e baixo custo de mercado resultaram numa maior aceitação deste tipo de produto. Contudo, a sua estrutura é especial e o seu fabrico requer o uso de ferramentas especiais como o PCD, pelo que a maquinagem de piso flutuante é das aplicações mais importantes do PCD na indústria da madeira. A camada exterior de melamina é geralmente muito abrasiva para as ferramentas de corte no geral, mesmo para o PCD <sup>[10]</sup>.

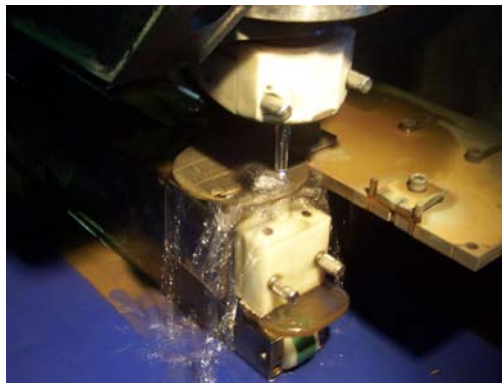
## **7.2. Sequência de fabrico das ferramentas**

Em ambas as partes deste trabalho foram comparadas fresas de acabamento para piso flutuante. Assim, foi necessário fabricar as duas fresas de acabamento com os diferentes tipos de PCD da ILJIN, que, não sendo exactamente iguais, apresentam a mesma sequência de fabrico, a seguir detalhada:

- 1 – Corte do disco de diamante em *bits*;

- 2 – Corte das patelas de aço para fazer o corpo da ferramenta;
- 3 – Torneamento;
- 4 – Fresagem;
- 5 – Brasagem dos *bits* ao corpo da ferramenta;
- 6 – Niquelagem do corpo da ferramenta;
- 7 – Afiação dos *bits* de diamante;
- 8 – Calibragem e rectificações da ferramenta;
- 9 – Inspeção final.

No corte do disco de diamante em *bits*, o operador consulta o desenho técnico para obter o código interno correspondente ao diamante para a ferramenta em causa. De seguida, com apoio de um programa informático específico, introduz as dimensões do disco e dos *bits* (detalhado no desenho técnico da ferramenta encomendada). O software gera então os dados necessários para introduzir na máquina de electroerosão por fio para cortar o disco em *bits* de acordo com as dimensões correctas (Figura 25).



**Figura 25** – Corte do disco de diamante em *bits* por electroerosão por fio.

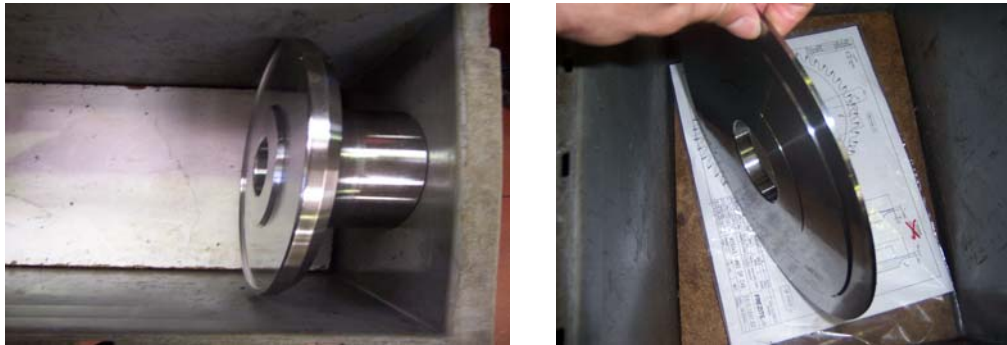
No corte das patelas de aço (Figura 26), o operador verifica no desenho técnico da ferramenta os códigos internos da empresa para os diferentes tipos de aço utilizados para escolher o diâmetro (no caso em estudo, uma patela de 250 mm de diâmetro) e o tipo de aço mais adequado.



**Figura 26** – Corte por serra mecânica das patelas de aço.

Na fase de torneamento, o operador recebe na máquina o programa de maquinagem já gerado no Departamento de Desenho, coloca a ferramenta no suporte e inicia a operação.

Esta etapa é algo demorada visto ser preciso desbastar muito material.



**Figura 27** – Aspecto das ferramentas após torneamento:  
a) Parte I; b) Parte II (ver tabela 5).

Segue-se a fresagem, que é uma operação necessária para dar as saídas correctas à ferramenta, para depois se efectuar a brasagem dos *bits*, previamente cortados, ao corpo da ferramenta.



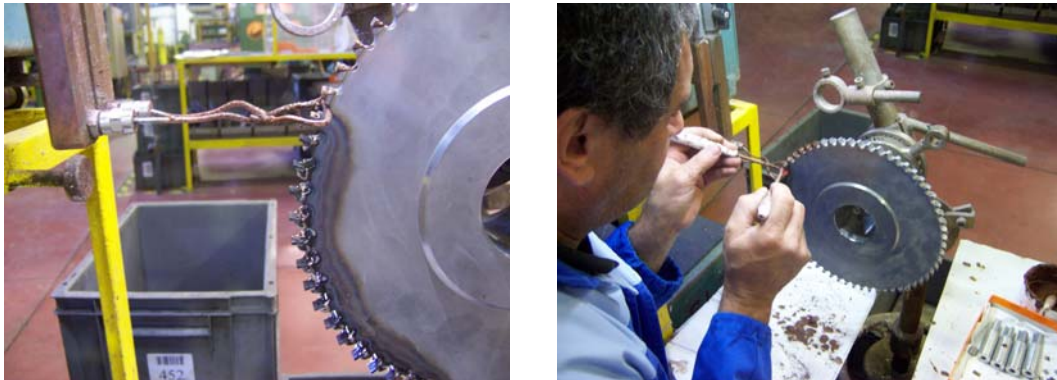
**Figura 28** – Aspecto das ferramentas após operação de fresagem:  
a) Parte I; b) Parte II (ver tabela 5).

Na etapa seguinte, que é a de preparação e brasagem, os *bits* de PCD passam por um banho de desengorduramento de tricloroetileno, são decapados manualmente e passam de novo pelo banho de tricloroetileno. O corpo da ferramenta passa também por um banho com água de lavagem.

Depois é possível efectuar a brasagem com uma liga de prata-cobre-cádmio (Figura 29). Antes de se efectuar a brasagem, aplica-se um fluxo para remoção dos filmes de óxidos potencialmente existentes à superfície de brasagem ou que venham a desenvolver-se durante o processo de brasagem. Há que ter em atenção que este produto é ligeiramente corrosivo.

Depois da brasagem, a ferramenta é colocada num recipiente com vermiculite para promover o seu arrefecimento lento de modo a evitar o desenvolvimento de fissuras e tensões.

Seguidamente, a ferramenta é lavada e decapada manualmente por um jacto de areia que é projectada, a alta velocidade e pressão, sobre a superfície a fim de promover a limpeza e remoção de material indesejado.



**Figura 29** – Brasagem dos *bits* de PCD no corpo da ferramenta.

É realizada posteriormente uma niquelagem do corpo da ferramenta com o objectivo de lhe conferir resistência à corrosão. Esta operação não é realizada na empresa mas sim numa empresa subcontratada para o efeito.

A ferramenta segue então para o centro de diamante, para o afiamento dos *bits* de diamante policristalino numa máquina de electroerosão, e finalmente para calibragem e rectificação.

Por último, e antes do envio da ferramenta para o cliente, procede-se ao controlo final levado a cabo por um dos elementos do Departamento da Qualidade.



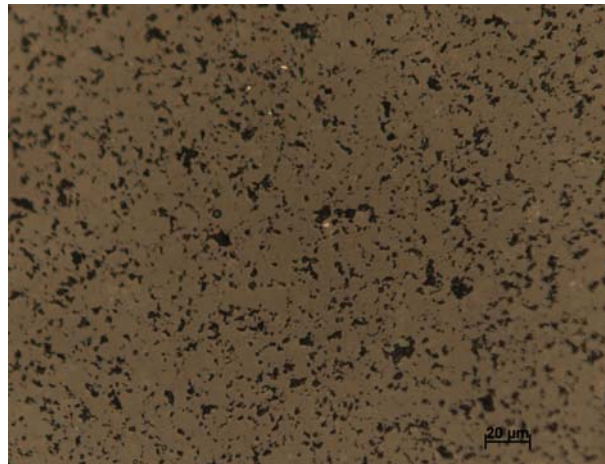
**Figura 30** – Aspecto das ferramentas após conclusão das sequências de fabrico:  
a) Parte I; b) Parte II (ver tabela 5).

### **7.3. Apresentação/Discussão de resultados**

#### **7.3.1. PARTE I (CTB010 vs CMW)**

##### **➤ Microestrutura**

A observação das microestruturas foi efectuada no laboratório do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da FEUP.



**Figura 31** – Fotomicrografia do diamante policristalino CTB010: fase clara – grãos de diamante; fase escura – cobalto. Amp. 500x.

Para fazer uma análise quantitativa dos constituintes presentes na microestrutura foi utilizado o software de análise de imagens PAQI.

**Tabela 6** – Parâmetros analisados com o PAQI para o CTB010.

| Parâmetro                                    | Mínimo | Máximo | Média |
|--|--------|--------|-------|
| Área do campo ( $\mu\text{m}^2$ )            | 73913  | 73913  | 73913 |
| Área da fase de diamante ( $\mu\text{m}^2$ ) | 65577  | 66925  | 66259 |
| Área da fase de diamante (%)                 | 89     | 91     | 90    |



**Figura 32** – Fotomicrografia do diamante policristalino CMW: fase clara – grãos de diamante; fase escura – cobalto. Amp. 500x.

**Tabela 7** – Parâmetros analisados com o PAQI para o CMW.

| Parâmetro                                    | Mínimo | Máximo | Média |
|--|--------|--------|-------|
| Área do campo ( $\mu\text{m}^2$ )            | 73913  | 73913  | 73913 |
| Área da fase de diamante ( $\mu\text{m}^2$ ) | 64495  | 66488  | 65600 |
| Área da fase de diamante (%)                 | 87     | 90     | 89    |

As imagens anteriores foram tiradas a *bits* de PCD após terem sido cortados por electroerosão. Analisando as microestruturas de ambos os tipos de PCD, verifica-se que os grãos de diamante (fase clara) no CTB010 parecem ligeiramente maiores que no CMW e com uma distribuição mais uniforme. Também é de referir que no CMW se observam umas zonas mais claras localizadas no ligante metálico (cobalto); estas “falhas” ou porosidades não deveriam existir e resultam muito provavelmente do arranque de cobalto na operação de corte por electroerosão dos discos de PCD. Este é um factor que, posteriormente, pode ter alguma influência no afiamento dos *bits* já brasados ao corpo da ferramenta visto que esta porosidade poderá ter alguma influência na condutividade eléctrica, parâmetro fundamental na operação de afiamento.

Ao analisar os dados obtidos com o PAQI (Tabela 6 e 7), constata-se que o CMW tem uma percentagem de diamante (fase clara) menor que o CTB010. Em termos de propriedades mecânicas, tal pode indiciar que o CTB010 terá um pouco mais de resistência que o CMW. Por outro lado, o CMW apresenta uma percentagem de cobalto mais elevada, o que pode indicar que será mais rápida a operação de corte por electroerosão. Contudo, sendo a diferença de aproximadamente um ponto percentual, não se poderão tirar grandes conclusões.

#### ➤ Tempo de afiamento

Foram registados os tempos de afiamento para cada uma das ferramentas (iguais em forma) de diamante policristalino (CTB010 e CMW), na mesma máquina de electroerosão (Vollmer QM 110 eco), que poderão ser consultados na tabela 8:

**Tabela 8** – Tempos de afiamento das ferramentas de corte com CTB010 e CMW na máquina de electroerosão (Vollmer QM 110 eco).

| Diamante policristalino | Tempo de afiamento |
|-------------------------|--------------------|
| <b>CTB010</b>           | 2h 38m 02s         |
| <b>CMW</b>              | 1h 44m 26s         |



**Figura 33** – Afiamento por electroerosão da ferramenta de diamante policristalino (ILJIN) na Vollmer QM 110 eco.

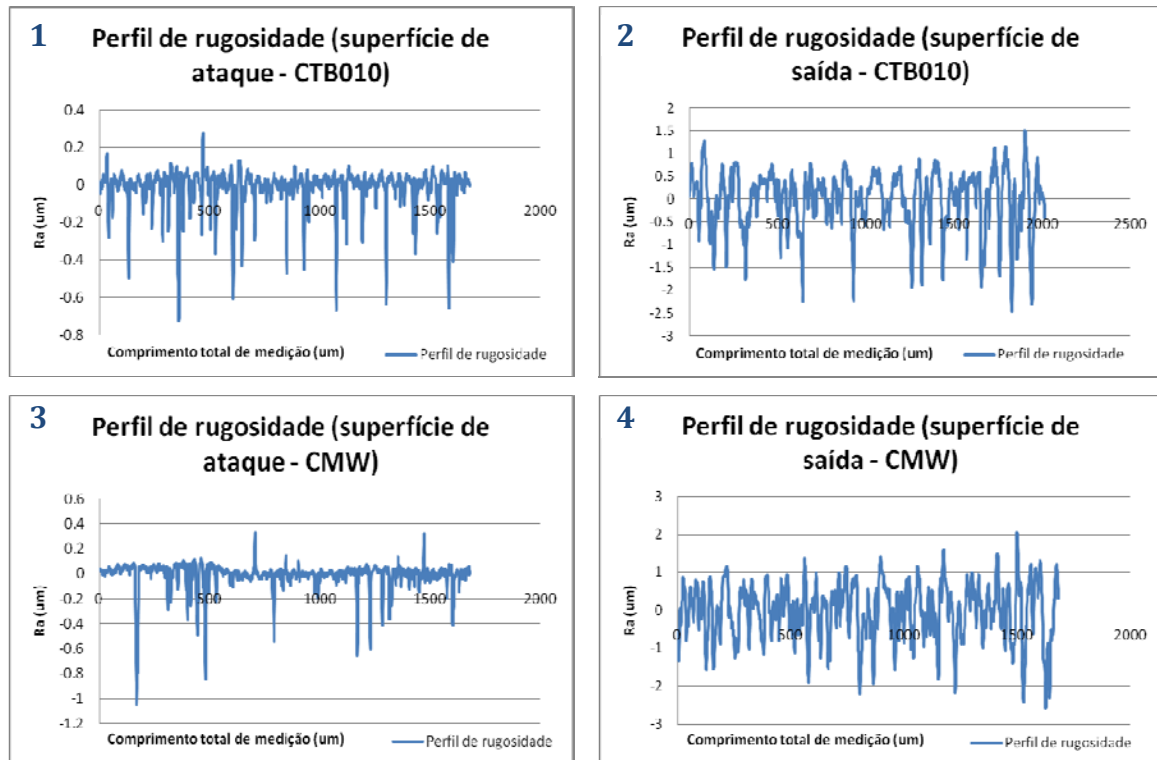
Analisando os tempos registados (Tabela 8), o CMW apresentou um desempenho superior ao do CTB010, demorando a operação de afiamento menos uma hora aproximadamente. Apesar de não se ter fabricado uma ferramenta nova com o diamante CTB010, este valor foi retirado de registos previamente efectuados pelo operador responsável pelo centro de diamante visto a FREZITE fabricar algumas ferramentas deste tipo. Este desempenho do CMW é condizente com os dados analisados com o PAQI em que a percentagem de cobalto no CMW é superior ao do CTB010, o que deixava antever um melhor desempenho do CMW no afiamento por electroerosão.

#### ➤ Qualidade da superfície / Metros cortados

Para aferir a qualidade superficial após afiamento, foram realizadas medições de rugosidade num rugosímetro Hommel Tester T4000 no Laboratório de Metrologia, Vibrações e Tribologia da FEUP. As medições foram executadas na superfície de ataque e de saída de cada uma das ferramentas.

**Tabela 9** – Valores de rugosidade obtidos para o CTB010 e o CMW

|        | Superfície medida ( $\mu\text{m}$ ) | Ra          | Rq   | Rz   | Ry   |
|--------|-------------------------------------|-------------|------|------|------|
| CTB010 | (face de ataque)                    | 0,09        | 0,18 | 1,22 | 2,27 |
|        | (face de saída)                     | <b>0,45</b> | 0,57 | 2,94 | 3,49 |
| CMW    | (face de ataque)                    | 0,05        | 0,11 | 0,82 | 1,12 |
|        | (face de saída)                     | <b>0,61</b> | 0,76 | 3,62 | 4,34 |

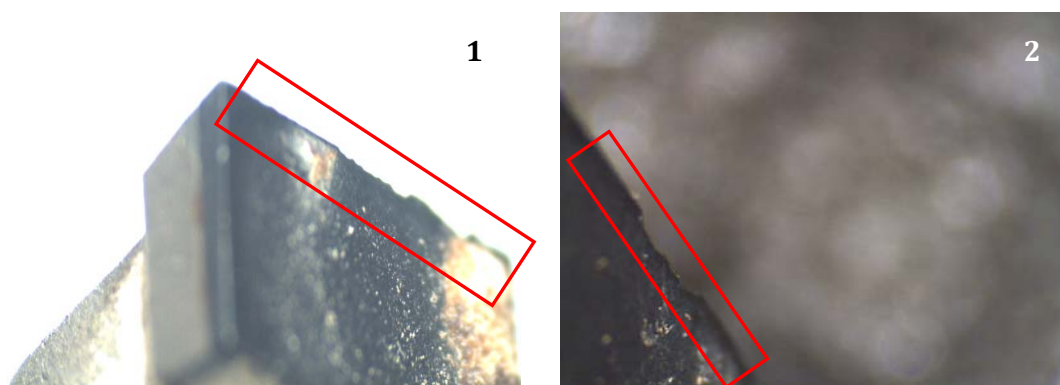


**Figura 34** – Perfis de rugosidade:

- 1 – Superfície de ataque (CTB010); 2 – Superfície de saída (CTB010);
- 3 – Superfície de ataque (CMW); 4 – Superfície de saída (CMW).

Após medição da rugosidade, as ferramentas seguiram para o cliente para uma linha de maquinagem de piso flutuante, tendo-se procedido ao registo do número de metros cortados por cada uma das ferramentas até sofrerem desgaste na aresta de corte, deixando de conferir um acabamento superficial satisfatório no piso flutuante.

Utilizou-se uma lupa para observar o desgaste na aresta de corte das ferramentas. As imagens do desgaste foram registadas com uma máquina digital acoplada à lupa.



**Figura 35** – Imagens do desgaste sofrido na aresta de corte pelas ferramentas de corte de diamante policristalino:

- 1 – CTB010; 2 – CMW.

**Tabela 10** – Metros lineares cortados pelas ferramentas.

| Diamante policristalino | Metros lineares cortados |
|-------------------------|--------------------------|
| <b>CTB010</b>           | 100055 m                 |
| <b>CMW</b>              | 95341 m                  |

Observa-se (Tabela 9) que a rugosidade média da ferramenta PCD com CMW é significativamente superior ( $0,61 \mu\text{m}$ ) à da ferramenta PCD com o CTB010 ( $0,45 \mu\text{m}$ ). É uma diferença algo inesperada, que se traduz num maior coeficiente de atrito na maquinagem do piso flutuante por parte da ferramenta com CMW. Logicamente, estará sujeita a um desgaste maior (Tabela 10).

É importante ter em atenção que o acabamento superficial duma superfície cortada de piso flutuante é um aspecto muito importante visto que o encaixe das placas de piso flutuante tem que ser perfeito e também porque qualquer imperfeição na superfície torna-se muito visível, pelo que as tolerâncias são muito apertadas. Quando as ferramentas de corte deixam de produzir peças de boa qualidade são substituídas e afiadas. A ferramenta com diamante da ILJIN CMW sofreu um desgaste por “*chipping*”, tal como poderá ser observado na figura 35.2. Este tipo de desgaste é comum na maquinagem de materiais não-homogéneos. A ferramenta foi retirada da produção após 95341 m de corte, valor um pouco abaixo dos 100055 m (Tabela 10) que a ferramenta com diamante da ELEMENT SIX, que também sofreu desgaste por “*chipping*” na aresta de corte (Figura 35.1), conseguiu cortar.

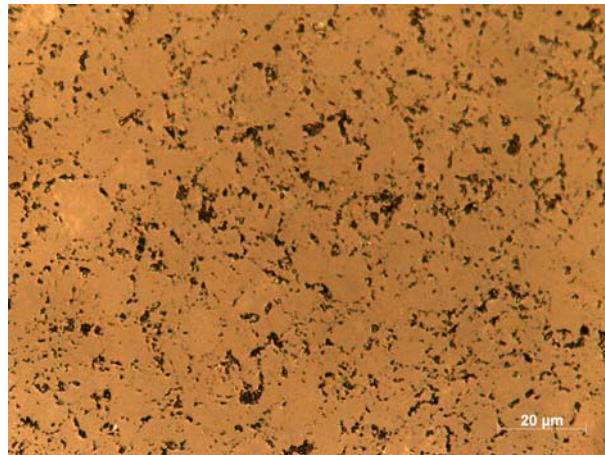
Ambas as ferramentas demonstraram um bom desempenho em termos de durabilidade para este tipo de ferramentas e aplicação, muito embora a ferramenta de PCD com diamante da ELEMENT SIX CTB010 se tenha apresentado um pouco mais eficaz na maquinagem deste tipo de piso flutuante relativamente à outra com diamante da ELEMENT SIX.

Em termos objectivos, o CTB010 da ELEMENT SIX afigura-se mais adequado para o corte deste tipo de piso flutuante que o CMW da ILJIN.

### 7.3.2. PARTE II (CTH025 vs CLX-II)

#### ➤ Microestrutura

A observação das microestruturas foi realizada no laboratório do Departamento de Eng<sup>a</sup> Metalúrgica e de Materiais da FEUP.

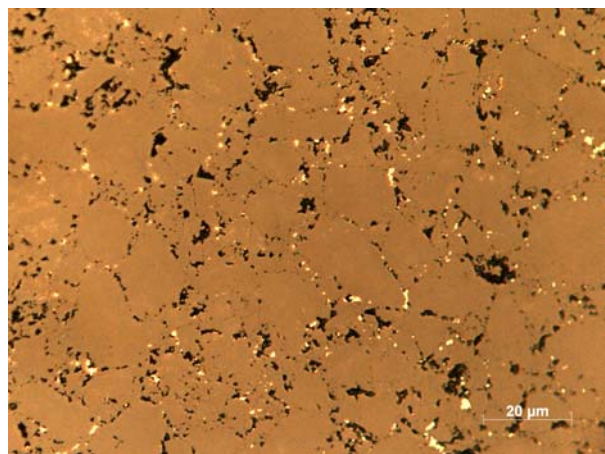


**Figura 36** – Fotomicrografia do diamante policristalino CTB025: fase clara – grãos de diamante; fase escura – cobalto. Amp. 500x.

Para fazer uma análise quantitativa dos constituintes presentes na microestrutura foi utilizado o software de análise de imagens PAQI.

**Tabela 11** – Parâmetros analisados com o PAQI para o CTH025.

| Parâmetro                                    | Mínimo | Máximo | Média |
|--|--------|--------|-------|
| Área do campo ( $\mu\text{m}^2$ )            | 73913  | 73913  | 73913 |
| Área da fase de diamante ( $\mu\text{m}^2$ ) | 67345  | 69148  | 68187 |
| Área da fase de diamante (%)                 | 91     | 94     | 92    |



**Figura 37** – Fotomicrografia do diamante policristalino CLX-II: fase clara – grãos de diamante; fase escura – cobalto. Amp. 500x.

**Tabela 12** – Parâmetros analisados com o PAQI para o CLX-II

| Parâmetro                                    | Mínimo | Máximo | Média |
|--|--------|--------|-------|
| Área do campo ( $\mu\text{m}^2$ )            | 73913  | 73913  | 73913 |
| Área da fase de diamante ( $\mu\text{m}^2$ ) | 69228  | 70478  | 69807 |
| Área da fase de diamante (%)                 | 94     | 95     | 94    |

Tal como na parte I, as imagens foram tiradas a *bits* de PCD após terem sido cortados por electroerosão. Observando as microestruturas de ambos os tipos de PCD, nota-se, tal como seria de esperar, que os grãos de diamante (fase clara) no CTH025 são de menor dimensão que os do CLX-II pelo facto deste ser de grão médio de 40 µm em oposição ao tamanho de grão médio de 25 µm do CTH025. Também é de referir que no CLX-II, tal como acontecia no CMW na parte I, são observáveis umas zonas mais claras localizadas no ligante metálico (cobalto). Tal, como naquele caso, estas “falhas” ou porosidades deverão resultar do arranque de cobalto na operação de corte por electroerosão dos discos de PCD, influenciando a condutividade eléctrica na etapa de afiamento por electroerosão. Atendendo a que esta falha se verifica nos dois tipos de PCD da ILJIN, tal significa que a qualidade destes materiais é inferior à dos PCD’s com diamante da ELEMENT SIX, ocorrendo uma ligação mais fraca do ligante metálico (cobalto), o que propicia o seu arranque durante a operação de electroerosão.

Analisando os dados adquiridos com o PAQI (Tabela 11 e 12), constata-se que o CLX-II tem uma percentagem de diamante (fase clara) maior que o CTH025, perfeitamente justificável por apresentar um tamanho de grão superior. Em termos de propriedades mecânicas, somos levados a admitir que o CLX-II terá uma resistência ao desgaste superior à do CTH025; por outro lado, tem uma percentagem de cobalto menor, o que indicia que a operação de afiamento por electroerosão será mais lenta. Contudo, a diferença é aproximadamente de dois pontos percentuais, não sendo possível, tal como na parte I, tirar grandes ilações.

#### ➤ Tempo de afiamento

Foram registados na tabela 13 os tempos de afiamento de cada uma das ferramentas (iguais em forma) de diamante policristalino (CTH025 e CLX-II), na mesma máquina de electroerosão (Vollmer QM 110 eco):

**Tabela 13** – Tempos de afiamento das ferramentas de corte com CTH025 e CLX-II na máquina de electroerosão (Vollmer QM 110 eco).

| Diamante policristalino | Tempo de afiamento |
|-------------------------|--------------------|
| CTH025                  | 9h 01m 25s         |
| CLX-II                  | 7h 00m 09s         |

Analisando os tempos obtidos, a performance do CLX-II foi superior à do CTH025, tendo demorado cerca de menos duas horas (Tabela 13). À partida, seria de esperar o contrário visto

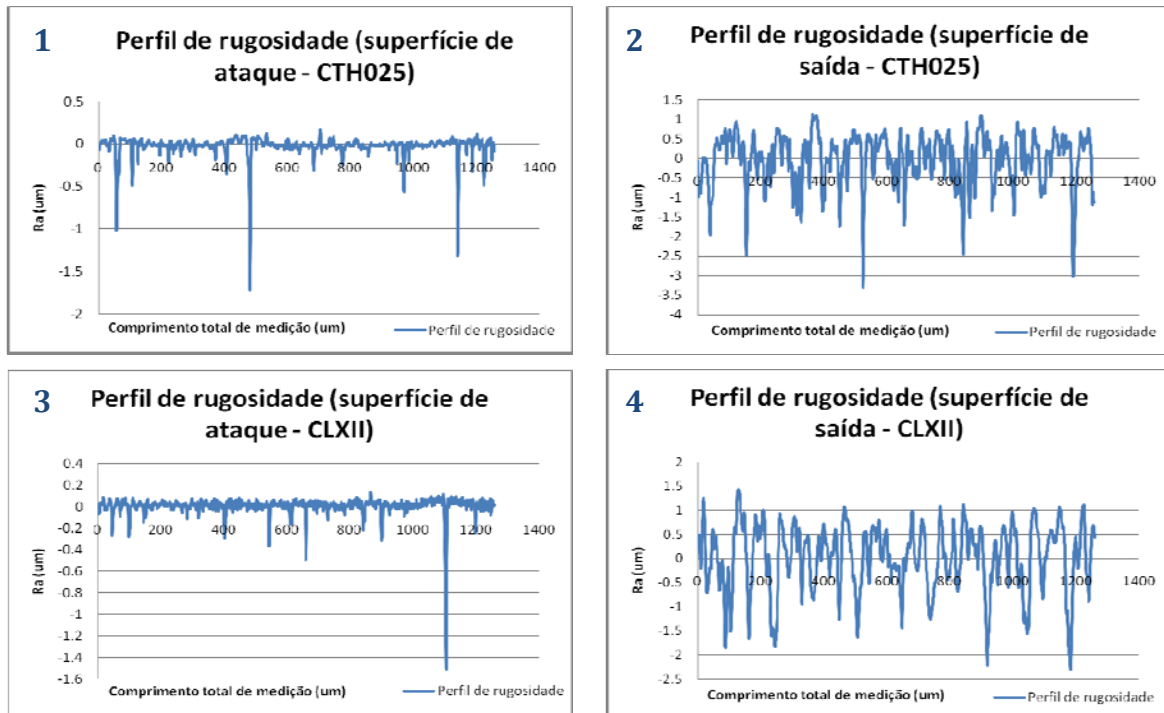
que o CTH025 tem uma percentagem de cobalto maior. Mas ao contrário do caso I, estes resultados não podem ser analisados de forma linear devido às condicionantes existentes, em termos de comparabilidade entre ambas as ferramentas pelo facto de não se terem fabricado duas ferramentas novas por questões económicas. Para a ferramenta de diamante policristalino com o CTH025, que já se encontrava em serviço, não havia registos de tempos de afiamento visto não ser uma ferramenta muito comum na FREZITE. Logo, o tempo de afiamento registado diz respeito a uma ferramenta com diamante CTH025, que veio do cliente para afiar pela nona vez, enquanto a ferramenta com o CLX-II foi afiada pela primeira vez. Uma ferramenta deste tipo pode ser afiada várias vezes, mas quando se trata duma ferramenta nova a ser afiada pela primeira vez, apenas se procede à remoção de material do *bit* de PCD. Numa ferramenta afiada pela nona vez, é igualmente removido material das costas do cortante, ou seja do corpo da ferramenta em aço, havendo um desbaste de material maior, o que faz com que as condições não sejam exactamente idênticas em ambos os casos, influenciando um pouco os tempos registados. Apesar de não ser possível interpretar de forma linear estes resultados, e recorrendo à experiência do operador responsável por esta operação, foi possível concluir que o tempo de afiamento registado pelo CLX-II foi normal em relação ao que geralmente acontece no afiamento de ferramentas deste género com diamante da ELEMENT SIX, CTH025. Porém, o ideal teria sido medir, tal como na parte I, o tempo de afiamento de duas ferramentas completamente novas, para que as condições fossem idênticas.

➤ **Qualidade da superfície / Metros cortados**

Para aferir a qualidade superficial destas ferramentas após afiamento, foram realizadas medições de rugosidade num rugosímetro Hommel Tester T4000, no laboratório de Tribologia, Vibrações e Manutenção Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP. As medições foram executadas na superfície de ataque e de saída de cada uma das ferramentas.

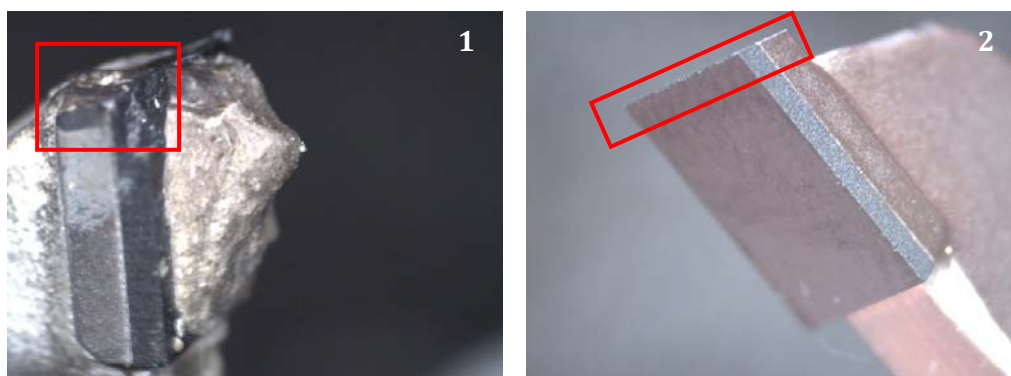
**Tabela 14** – Valores de rugosidade obtidos no Hommel Tester T4000 para o CTH025 e o CLX-II

|        | Superfície medida ( $\mu\text{m}$ ) | Ra          | Rq   | Rz   | Ry   |
|--------|-------------------------------------|-------------|------|------|------|
| CTH025 | (face de ataque)                    | 0,05        | 0,12 | 0,93 | 1,55 |
|        | (face de saída)                     | <b>0,47</b> | 0,61 | 3,19 | 3,87 |
| CLX-II | (face de ataque)                    | 0,06        | 0,16 | 0,93 | 2,29 |
|        | (face de saída)                     | <b>0,56</b> | 0,69 | 3,07 | 3,64 |



**Figura 38** – Perfis de rugosidade:  
1 – Superfície de ataque (CTH025); 2 – Superfície de saída (CTH025);  
3 – Superfície de ataque (CLX-II); 4 – Superfície de saída (CLX-II).

Após medição de rugosidades, as ferramentas seguiram para o cliente para uma linha de maquinagem de piso flutuante, tendo-se efectuado o registo dos metros cortados por cada uma das ferramentas até sofrerem desgaste na aresta de corte, deixando de conferiir um acabamento superficial do piso flutuante satisfatório Para observar o desgaste na aresta de corte das ferramentas utilizou-se uma lupa. Registaram-se as imagens do desgaste recorrendo a uma máquina digital acoplada à lupa.



**Figura 39** – Imagem do desgaste sofrido na aresta de corte pelas ferramentas de corte de diamante policristalino:

1 – CTH025; 2 – CLX-II.

**Tabela 15** – Metros lineares cortados pelas ferramentas.

| Diamante policristalino | Metros lineares cortados |
|-------------------------|--------------------------|
| <b>CTH025</b>           | 45663 m                  |
| <b>CLX-II</b>           | 33750 m                  |

Analisando os dados referentes à qualidade da superfície, observa-se que a rugosidade média da ferramenta PCD com CLX-II é superior ( $0,56 \mu\text{m}$ ) à da ferramenta PCD com o CTH025 ( $0,47 \mu\text{m}$ ) (Tabela 14). Tal facto seria de esperar visto que o grão de diamante do CLX-II é mais grosseiro. Apesar de um diamante mais grosseiro ser mais resistente ao desgaste, o facto de o CLX-II apresentar uma superfície mais rugosa em relação ao CTH025 faz com que o coeficiente de atrito na maquinagem do piso flutuante seja maior e, consequentemente, esteja sujeito a um desgaste maior.

A ferramenta com diamante da ILJIN CLX-II sofreu um desgaste por “*chipping*” prematuro (ver figura 39.2) que, apesar de não ser muito acentuado, foi o suficiente para originar um acabamento superficial insatisfatório, fazendo com que a ferramenta fosse retirada da produção ao fim de apenas 33750 m de corte, valor muito abaixo dos 45663 m que a ferramenta com diamante da ELEMENT SIX (Tabela 15), que também sofreu desgaste por “*chipping*” na aresta de corte, conseguiu cortar. É de referir também que, na prática, uma ferramenta de acabamento para este tipo de material costuma cortar mais metros do que ambas as ferramentas cortaram; por isso, nenhuma das duas ferramentas apresentou um comportamento brilhante neste tipo aplicação. No caso da ferramenta com o CLX-II, o seu comportamento muito fraco poderá ser atribuído ao facto de ser um diamante com um grão muito grosseiro que não permitirá obter o grau de acabamento superficial desejado. No caso da ferramenta com o CTH025, as razões não são tão óbvias e nem sempre é fácil de decifrar, mesmo para indivíduos experientes na matéria, porque é que algumas ferramentas de diamante policristalino não apresentam a durabilidade esperada. Uma das razões que permite justificar um desempenho tão fraco pode ser o facto das rugosidades medidas após afiamento apresentarem valores superiores ao esperado, que deveriam rondar os  $0,25 \mu\text{m}$ . Isto pode indiciar que as máquinas não estão a operar da forma mais eficiente, produzindo ferramentas com arestas de corte com uma qualidade superficial desajustada.

Mesmo assim, poder-se-á concluir que a ferramenta de PCD com diamante da ELEMENT SIX CTH025 se afigura mais eficaz na maquinagem deste tipo de material, e portanto ser melhor para o corte de piso flutuante do que a de diamante da ILJIN CLX-II.

#### **7.4. Considerações finais**

➤ Ambas as ferramentas com diamante da ELEMENT SIX demonstraram ter um desempenho superior às ferramentas com diamante da ILJIN na maquinagem de piso flutuante;

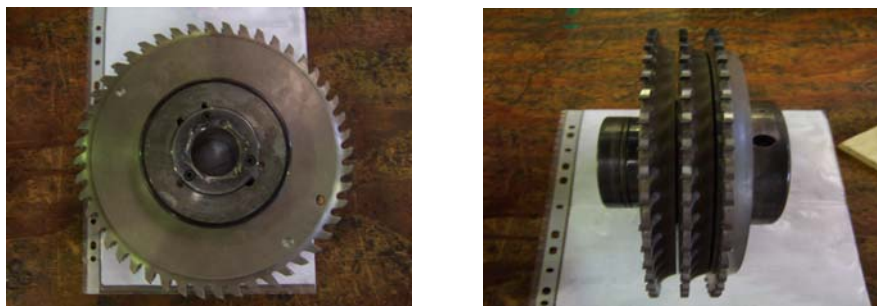
➤ O desgaste por “*chipping*” é o mecanismo de desgaste mais comum nas ferramentas de diamante policristalino na maquinagem de piso flutuante;

➤ Os valores de rugosidade na superfície de saída das ferramentas testadas (CTB010 – 0,45  $\mu\text{m}$  / CMW – 0,61  $\mu\text{m}$  / CTH025 – 0,47  $\mu\text{m}$  / CLX-II – 0,56  $\mu\text{m}$ ) são mais elevados que o expectável (0,25  $\mu\text{m}$ ), influenciando a durabilidade das ferramentas.

### **8. Influência da variação de parâmetros de electroerosão no afiamento de ferramentas de diamante policristalino**

Durante a realização do trabalho chegou-se à conclusão que uma das etapas mais críticas, em termos de custos, no fabrico de ferramentas de diamante policristalino é a etapa de afiamento por electroerosão, devido ao tempo excessivo que tal operação envolve. Tome-se o exemplo do afiamento duma das fresas de acabamento (CTH025) analisada previamente, com 3 *steps* de 48 *bits* cada (figura 40), a uma velocidade de 1 a 3 mm/min. É uma operação que poderá demorar aproximadamente 9 horas, mas há casos de ferramentas que demoram um dia inteiro para serem afiadas.

Os factores que influenciam o tempo de afiamento são os parâmetros da máquina (tensão dos impulsos, impulsos de corrente, etc.), o número e a geometria dos *bits*, bem como a própria máquina de electroerosão (modelo mais recente ou não).



**Figura 40** – Fresa de acabamento de piso flutuante (3 *steps*/ 48 *bits* em cada *step*).

No princípio, os fabricantes de máquinas de electroerosão concediam quase total liberdade na escolha dos parâmetros a utilizar pelo operador da máquina na maquinagem das ferramentas de corte. Contudo, hoje em dia, com o aprofundamento dos conhecimentos sobre a influência desses parâmetros na qualidade da superfície cortada e no tempo de afiamento, as máquinas de electroerosão para diamante policristalino já possuem programas pré-definidos, que variam em função do tamanho de grão e da espessura da camada de diamante, do facto de a superfície do PCD ser polida ou não, do grau de erosão, etc.

Na figura 41 é possível visualizar o menu da máquina de electroerosão que gere a operação de acordo com os dados referidos anteriormente.

Cada um dos programas de erosão apresentados (3 - figura 41) divide-se em quatro graus de erosão (4 – figura 41). De referir que o operador só poderá modificar os graus de erosão próprios de cada programa de erosão.

A tabela 16 apresenta a disposição dos diferentes graus de erosão (desbaste grosseiro, desbaste, acabamento, acabamento fino) consoante o programa de erosão. Tanto o programa de erosão, como os graus de erosão, são identificados por números pré-definidos na máquina de electroerosão, tal como esquematizado na tabela 16.

| EROSION PROGRAMS  |        | 1 -     |          |               |      |  |
|-------------------|--------|---------|----------|---------------|------|--|
|                   |        | 3       |          |               |      |  |
|                   |        | poliert |          | nicht poliert |      |  |
| PKD 002, GE 1500  | 1,6 mm | 1       | 1        | 3             | 4    |  |
| PKD 002, GE 1500  | 3,2 mm | 3       | 9        | 11            | 12   |  |
| PKD 010, GE 1300  | 1,6 mm | 5       | 17       | 18            | 19   |  |
| PKD 010, GE 1300  | 3,2 mm | 7       | 25       | 26            | 27   |  |
| PKD 025, GE 1500  | 1,6 mm | 9       | 33       | 34            | 35   |  |
| PKD 025, GE 1500  | 3,2 mm | 11      | 41       | 42            | 43   |  |
| Zerspaner         |        | 13      | 49       | 50            | 51   |  |
| Profilbearbeitung |        | 15      | 57       | 58            | 59   |  |
| Round erosion     |        | 17      | 65       | 66            | 67   |  |
| Saws              |        | 19      | standard |               | fine |  |
|                   |        |         | 73       | 74            | 75   |  |
|                   |        |         | 76       | 20            | 77   |  |
|                   |        |         |          |               | 78   |  |
|                   |        |         |          |               | 79   |  |
|                   |        |         |          |               | 80   |  |
| HM, HSS           |        | 23      | 89       | 90            | 91   |  |
|                   |        |         | 92       | 24            | 93   |  |
|                   |        |         |          |               | 94   |  |
|                   |        |         |          |               | 95   |  |
|                   |        |         |          |               | 96   |  |

**Figura 41** – Vista do menu do programa que gere a erosão na Vollmer QM 110 eco:

- 1 – Linhas para o material a ser maquinado;
- 2 – Grupo de linhas para o tipo de maquinagem;
- 3 – Coluna para o programa de erosão;
- 4 – Linhas para os graus de erosão;
- 5 – Grupo de colunas para eléctrodos de rotação polidos;
- 6 – Grupo de colunas para eléctrodos de rotação não polidos.

**Tabela 16** – Disposição dos graus de erosão.

| Programa de erosão | Desbaste grosseiro | Desbaste | Acabamento | Acabamento fino | Programa de erosão | Desbaste grosseiro | Desbaste | Acabamento | Acabamento fino |
|--------------------|--------------------|----------|------------|-----------------|--------------------|--------------------|----------|------------|-----------------|
| 1                  | 1                  | 2        | 3          | 4               | 13                 | 49                 | 50       | 51         | 52              |
| 2                  | 5                  | 6        | 7          | 8               | 14                 | 53                 | 54       | 55         | 56              |
| 3                  | 9                  | 10       | 11         | 12              | 15                 | 57                 | 58       | 59         | 60              |
| 4                  | 13                 | 14       | 15         | 16              | 16                 | 61                 | 62       | 63         | 64              |
| 5                  | 17                 | 18       | 19         | 20              | 17                 | 65                 | 66       | 67         | 68              |
| 6                  | 21                 | 22       | 23         | 24              | 18                 | 69                 | 70       | 71         | 72              |
| 7                  | 25                 | 26       | 27         | 28              | 19                 | 73                 | 74       | 75         | 76              |
| 8                  | 29                 | 30       | 31         | 32              | 20                 | 77                 | 78       | 79         | 80              |
| 9                  | 33                 | 34       | 35         | 36              | 21                 | 81                 | 82       | 83         | 84              |
| 10                 | 37                 | 38       | 39         | 40              | 22                 | 85                 | 86       | 87         | 88              |
| 11                 | 41                 | 42       | 43         | 44              | 23                 | 89                 | 90       | 91         | 92              |
| 12                 | 45                 | 46       | 47         | 48              | 24                 | 93                 | 94       | 95         | 96              |

O programa de erosão mais comum utilizado pela FREZITE para o afiamento duma ferramenta diamantada é o número 5 e os graus de erosão mais comuns são o de desbaste (nº 18) e o de acabamento (nº 19); o de desbaste grosseiro e o de acabamento fino não são tão utilizados. O desbaste grosseiro utiliza-se basicamente quando a ferramenta é nova e vai ser afiada pela primeira vez, pelo que é necessário retirar muito material. Por sua vez, o acabamento fino não é muito utilizado no afiamento de ferramentas diamantadas para maquinagem de madeira e seus derivados porque não se justifica o tempo extra que esta etapa requer quando, com apenas um acabamento normal, são atingidos os requisitos exigidos na maquinagem deste tipo de materiais. No caso da maquinagem de metais, o acabamento fino já se justifica devido às tolerâncias apertadas exigidas; o acabamento superficial das ferramentas para o corte de metais deve apresentar valores de rugosidade abaixo dos 0,05  $\mu\text{m}$ .

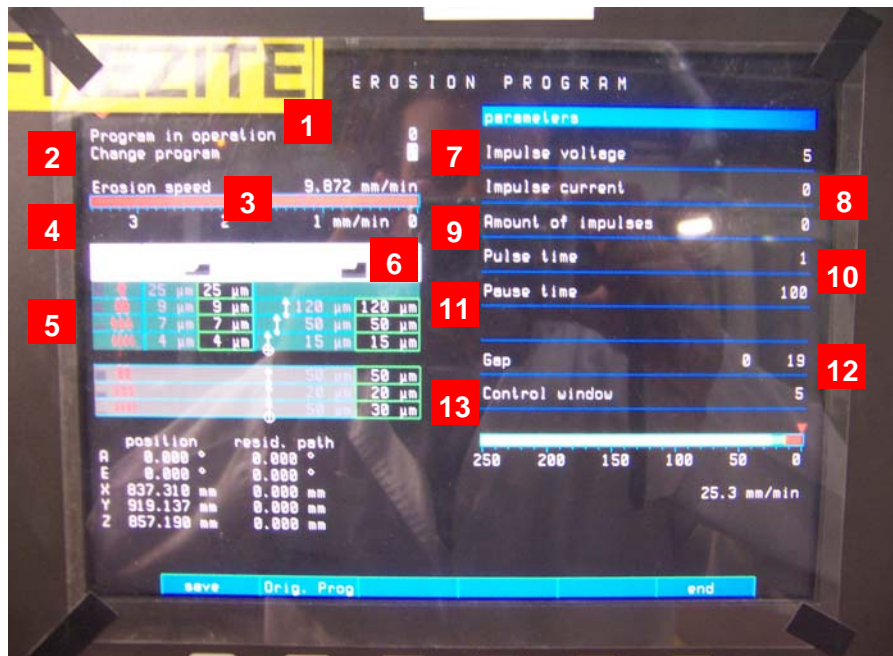
A escolha deste programa de erosão (nº 5) reside no facto da empresa utilizar no fabrico das suas ferramentas PCD principalmente diamante policristalino de grão médio (10  $\mu\text{m}$ ) da ELEMENT SIX, e com uma espessura de 1,6 mm.

Tendo estes factores em conta, foi decidido afiar uma ferramenta com um diamante policristalino de grão médio (10  $\mu\text{m}$ ) da ELEMENT SIX (Figura 42), utilizando o programa de erosão nº 5 e alterando os parâmetros relativos aos graus de erosão (Figura 43). O objectivo de variar estes parâmetros seria o estudo dos tempos de afiamento e tentar posteriormente relacioná-los com a rugosidade superficial para indagar a possibilidade de obter ganhos em termos de tempo útil de trabalho, tendo por base de comparação as diferenças de qualidade superficial resultantes da alteração dos parâmetros.



**Figura 42** – Ferramenta de corte de diamante policristalino com *bits* de PCD de grão médio (10 µm) da ELEMENT SIX.

Foi decidido, conjuntamente com o responsável pelo centro de diamante (para facilitar a execução desta parte experimental), realizar o afiamento de 4 *bits* devidamente identificados, variando apenas um dos parâmetros, os impulsos de corrente. Comparou-se o *bit* 1 com o *bit* 3 (execução dum desbaste e acabamento em ambos os *bits*), e o *bit* 2 com o *bit* 4 (além do desbaste e acabamento, realizou-se um acabamento fino em ambos os *bits*). Na tabela 17 está esquematizada a configuração definida, com indicação dos respectivos valores de impulsos de corrente utilizados:



**Figura 43** – Vista do ecrã da máquina de electroerosão (Vollmer QM 110 eco) onde se poderão observar os parâmetros referentes a um grau de erosão:

- 1 – Programa em operação;
- 2 – Modificação do programa;

- 3 – Velocidade de erosão;
- 4 – Indicação óptica da velocidade de erosão;
- 5 – Graus de erosão;
- 6 – Coluna para os valores de avanço;
- 7 – Tensão dos impulsos;
- 8 – Impulsos de corrente;
- 9 – Número de impulsos;
- 10 – Tempo de impulso;
- 11 – Tempo de pausa;
- 12 – Abertura do arco eléctrico;
- 13 – Janela de regras.

**Tabela 17** – Esquema da configuração definida para o afiamento com variação dos impulsos de corrente.

| <b>Bit</b> | <b>Programa de erosão</b> | <b>Graduações de erosão</b> | <b>Impulsos da corrente</b> |
|------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>1</b>   | 5                         | 18                          | 27                          |
|            |                           | 19                          | 6                           |
| <b>2</b>   | 5                         | 18                          | 27                          |
|            |                           | 19                          | 6                           |
|            |                           | 20                          | 4                           |
| <b>3</b>   | 5                         | 18                          | 30                          |
|            |                           | 19                          | 9                           |
| <b>4</b>   | 5                         | 18                          | 30                          |
|            |                           | 19                          | 9                           |
|            |                           | 20                          | 7                           |



**Figura 44** – Electroerosão por mó da ferramenta de diamante policristalino na Vollmer QM 110 eco.

Foram registados (tabela 18), para cada um dos parâmetros, os tempos de afiamento de cada *bit*.

**Tabela 18** – Tempos registados no afiamento de cada *bit*.

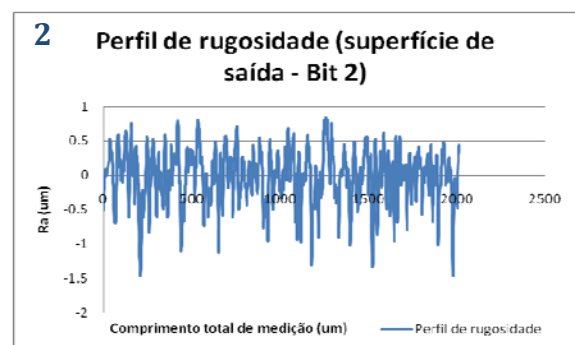
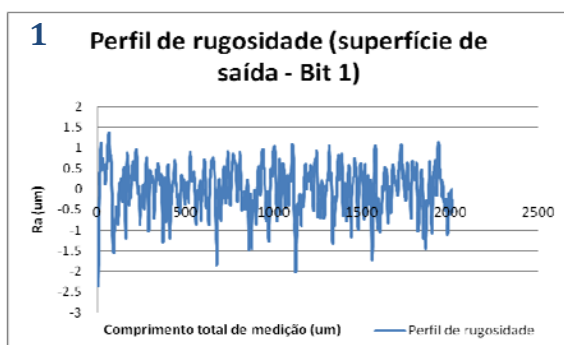
| <b>Bits</b> | <b>Tempo de afiamento</b> |
|-------------|---------------------------|
| <b>1</b>    | 4min 37s                  |
| <b>2</b>    | 6min 18s                  |
| <b>3</b>    | 3min 23s                  |
| <b>4</b>    | 4min 58s                  |

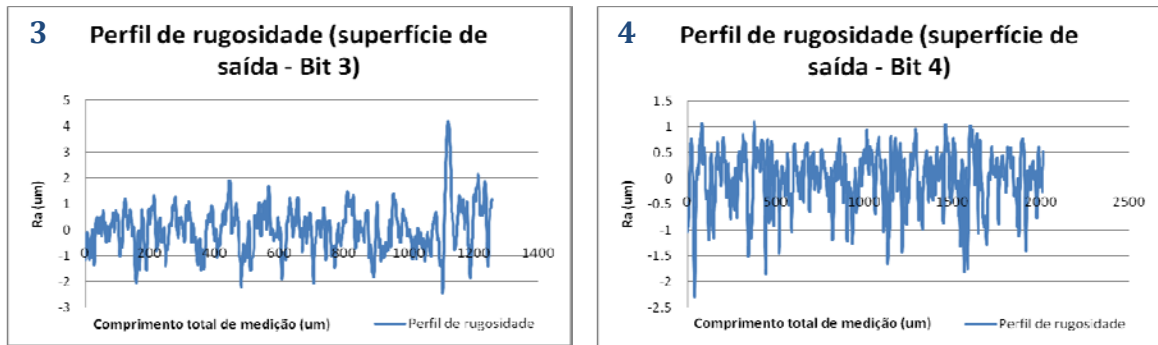
Terminado o afiamento, a ferramenta foi encaminhada para o Laboratório de Metrologia, Vibrações e Tribologia da FEUP para se efectuarem as medições de rugosidade nos *bits* que tinham sido afiados.

As medidas foram determinadas, utilizando o Hommel Tester T4000, na superfície de saída de cada um dos *bits* afiados da ferramenta em questão, encontrando-se registados na tabela seguinte.

**Tabela 19** – Valores de rugosidade obtidos na superfície de saída de cada *bit* afiado.

| <b>Bits (<math>\mu\text{m}</math>)</b> | <b>Ra</b>   | <b>Rq</b> | <b>Rz</b> | <b>Ry</b> |
|--|-------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>1</b>                               | <b>0,44</b> | 0,56      | 2,95      | 3,55      |
| <b>2</b>                               | <b>0,36</b> | 0,51      | 2,64      | 3,73      |
| <b>3</b>                               | 0,58        | 0,75      | 3,67      | 5,24      |
| <b>4</b>                               | <b>0,47</b> | 0,60      | 2,90      | 3,89      |





**Figura 45** – Perfis de rugosidade:  
1 – Bit 1; 2 – Bit 2; 3 – Bit 3; 4 – Bit 4.

O bit 3 (0,58 µm) apresenta um Ra um pouco superior à do bit 1 (0,44 µm), e o mesmo se pode dizer do bit 4 (0,47 µm) em relação ao bit 2 (0,36 µm) (Tabela 19). Tal diferença provém do aumento dos impulsos de corrente, que diminui o tempo de afiamento em detrimento da qualidade de acabamento superficial. A questão de variar os parâmetros prende-se então com a aplicação e objectivo exigido para a ferramenta.

O afiamento de bits por electroerosão, após aumento dos impulsos de corrente, deverá ser encarado como uma opção bastante atractiva desde que conduza a valores de Ra dentro dos requisitos de maquinagem pretendidos para uma dada aplicação. Efectivamente, não serão despicientes os ganhos em termos de horas de trabalho, com a consequente diminuição dos custos de produção duma dada ferramenta.

Hipoteticamente, se realizarmos o afiamento duma ferramenta semelhante à da figura 40, com as diferentes configurações dos graus de erosão, e fazendo variar os impulsos de corrente, podemos verificar que os ganhos em termos de tempo de afiamento são significativos (Tabela 20).

**Tabela 20** – Simulação de uma operação de afiamento de uma ferramenta diamantada de acabamento para piso flutuante (3 steps – 48 bits em cada step, com diferentes configurações dos graus de erosão, fazendo variar os impulsos de corrente).

| Bit | Programa de erosão | Gradações de erosão | Impulsos da corrente | Tempo de afiamento |
|-----|--------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 1   | 5                  | 18                  | 27                   | 11h 4m 48s         |
|     |                    | 19                  | 6                    |                    |
| 2   | 5                  | 18                  | 27                   | 15h 7m 24s         |
|     |                    | 19                  | 6                    |                    |
|     |                    | 20                  | 4                    |                    |
| 3   | 5                  | 18                  | 30                   | 8h 7m 24s          |
|     |                    | 19                  | 9                    |                    |
|     |                    | 18                  | 30                   |                    |
| 4   | 5                  | 19                  | 9                    | 11h 55m 24s        |
|     |                    | 20                  | 7                    |                    |

Outro aspecto importante a ter em atenção é a comparação entre os graus de acabamento dos *bits* 1 e 2. Chegou-se à conclusão que o acabamento fino na maquinagem da madeira e seus derivados não se justifica visto que, por exemplo, neste caso, a diferença seria de 4 horas aproximadamente. É uma diferença significativa, apesar de se obter nesta situação uma melhoria de  $0,08 \mu\text{m}$  no valor de  $R_a$  com acabamento fino. Se o valor de  $R_a$  sem acabamento fino rondasse os  $0,25 \mu\text{m}$ , tal como esperado, seria mais que suficiente para a maquinagem deste tipo de materiais. Logo não faz sentido realizar o acabamento fino em ferramentas diamantadas para a maquinagem de madeira e seus derivados.

Verifica-se que, a exemplo do já constatado para as rugosidades medidas previamente, que os resultados obtidos são um pouco mais elevados do que seria de esperar visto que o fabricante da máquina (Vollmer) indica, para um desbaste normal e acabamento, um  $R_a$  a rondar os  $0,25 \mu\text{m}$ ; esse valor descera aproximadamente para os  $0,15 \mu\text{m}$  se for realizado um acabamento fino. As discrepâncias obtidas poderiam resultar de algum tipo de erro na medição com o rugosímetro do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP. Para chegar a alguma conclusão e aferir o equipamento, mediu-se no mesmo rugosímetro uma ferramenta previamente analisada no fornecedor das máquinas de electroerosão. Os valores obtidos no rugosímetro do Departamento de Engenharia Mecânica foram semelhantes aos valores indicados pelo fornecedor das máquinas de electroerosão.

Como todos os afiamentos analisados foram realizados na mesma máquina de electroerosão na FREZITE, poder-se-á admitir que a máquina não estará correctamente afinada, ou até mesmo que o gerador não se encontra a trabalhar nas condições mais adequadas.

### **8.1. Considerações finais**

- Foi demonstrado que o acabamento fino é uma etapa desnecessária no afiamento de ferramentas para a maquinagem de madeira e seus derivados;
- O aumento do valor dos impulsos de corrente na máquina de electroerosão induz uma diminuição do tempo de afiamento, o que se traduz em ganhos consideráveis em termos de custos associados àquela operação.

## **9. Trabalho Futuro**

- Desenvolver e acompanhar novas ferramentas com outros tipos de diamante de forma a otimizar o desempenho das ferramentas da FREZITE na maquinagem de diversas aplicações de madeira e seus derivados;

- Estudar a influência da variação de outros parâmetros nas máquinas de electroerosão visando uma diminuição do tempo de afiamento, sem perda significativa da qualidade superficial da aresta de corte;
- Determinar as razões que conduzem à obtenção de valores de rugosidade demasiado elevados após afiamento na máquina Vollmer. Para tal, deverá ser desenvolvido um estudo exaustivo de comparação entre os valores de Ra obtidos no afiamento com a máquina de electroerosão que foi utilizada neste trabalho e com outras máquinas idênticas existentes na empresa.

## 10. Bibliografia

- [1] – Apontamentos Figueiredo, Fernando – *FREZITE – Ferramentas de Corte, SA*, 1998
- [2] Prof. H. Amorim; Processos de Fabricação por Usinagem. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [http://www.ufrgs.br/gpfai/download/eng03343\\_10.pdf](http://www.ufrgs.br/gpfai/download/eng03343_10.pdf), acessido em 25/10/2007
- [3] Prof. R. P. Zeilmann; Ferramentas de Pedras. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, [http://hermes.ucs.br/ccet/demc/rpzeilma/Docs/INTRO\\_GEODEF.pdf](http://hermes.ucs.br/ccet/demc/rpzeilma/Docs/INTRO_GEODEF.pdf), acessido em 25/10/2007
- [4] Prof. H. Amorim. “Movimentos e parâmetros de corte”, <http://www.ufrgs.br/gpfai/download/torneamento.pdf>, acessido em 2/12/2007
- [5] Disciplina de Processos de Usinagem. Curso Técnico em Eletromecânica. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas, <http://academicos.cefetmg.br/admin/downloads/2104/Apostila%20de%20Usinagem.pdf>, acessido em 25/10/2007
- [6] Prof. F. J. L. Alves; Materiais de Construção Mecânica II. Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, FEUP, <http://paginas.fe.up.pt/~falves/1aapresentacao.pdf>, acessido em 20/12/2007
- [7] J. Paulo Davim (1995). Princípios da maquinagem, Livraria Almedina – Coimbra;
- [8] Steve Krar, A. C. (1997). Technology of Machine Tools, McGraw-Hill; 5º edition;
- [9] Edwards, R. (1993). Cutting Tools, The Institute of Materials.

- [10] Q.S. Bai, S.Chen, (2002). "Research and development of polycrystalline diamond woodworking tools." *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* (20): pp. 395-400.
- [11] T.J. Shin, J.O. Oh et al., (2004). "The mechanism of abnormal grain growth in polycrystalline diamond during-high temperature sintering." *Diamond and Related Materials* (13): pp.488-494
- [12] P.J. Heath, (2001). "Development in applications of PCD tooling." *Journal of Materials Processing Technology* (116): pp.31-38
- [13] M.W. Cook, P.K. Bossom, (2000). "Trends and recent developments in the material manufacture cutting tool application of polycrystalline diamond and polycrystalline cubic boron nitride." *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* (18): pp.147-152
- [14] P. Philbin, S. G. (2005). "Characterisation of the wear behaviour of polycrystalline diamond (PCD) tools when machining wood-based composites". *Journal of Materials Processing Technology* (162–163): pp. 665–672.
- [15] J.A. Arsecularatne, L.C. Zhang et al. (2006). "Wear and tool life of tungsten carbide, PCBN and PCD cutting tools". *International Journal of Machine Tools and Manufacture* (46): pp.482-491.
- [16] [Http://www.imsteel.com/newsroom\\_article08.htm](http://www.imsteel.com/newsroom_article08.htm), acessido em 25/11/2007
- [17] Q.S. Bai, Y. X. Y., Phillip Bex, G. Zhang (2004). "Study on wear mechanisms and grain effects of PCD tool in machining laminated flooring". *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* (22): pp.111-115.
- [18] Whitehouse, DJ. (1994). *Handbook of Surface Metrology*, Bristol: Institute of Physics Publishing.
- [19] <http://en.wikipedia.org/wiki/Roughness>, acessido em 21/5/2008
- [20] Prof. M. B. da Silva; Estudo do desgaste de ferramenta de corte e rugosidade superficial com o auxílio da emissão acústica no fresamento. Universidade Federal de Uberlândia, Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, [http://www.propp.ufu.br/revistaeletronica/Edicao%202006\\_1/C/rodrigo\\_henrique.pdf](http://www.propp.ufu.br/revistaeletronica/Edicao%202006_1/C/rodrigo_henrique.pdf), acessido em 14/1/2008

- [21] S. Zahwi, A.M. Mekawi (2001). “Some effects of stylus force on scratching surfaces”. International Journal of Machine Tools and Manufacture (5): pp. 2011-2015.
- [22] Disciplina de Processos de Usinagem. Curso Técnico em Eletromecânica. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas, <http://academicos.cefetmg.br/admin/downloads/2104/aula%20de%20Rugosidades.doc>,  
acedido em 22/5/2008
- [23] [www.mspc.eng.br/tecdiv/rugosid.asp](http://www.mspc.eng.br/tecdiv/rugosid.asp), acessido em 21/5/2008
- [24] E.B. Guitrau (1997). The EDM Handbook, Hanser Gardner Publications
- [25] Sommer, C., Sommer, S. (2005). The Complete EDM Handbook, Advance Publishing.
- [26] <http://www.reliableedm.com>, acessido em 21/5/2008