



João Miguel Almeida
Tomás Azevedo
Pereira

Maquinagem *laser* de materiais ultraduros,
condições de processamento de micro
maquinagem em formas 3D em *PCD*



**João Miguel Almeida
Tomás Azevedo
Pereira**

**Maquinagem *laser* de materiais ultraduros,
condições de processamento de micro
maquinagem em formas 3D em *PCD***

Projeto apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizado sob orientação científica do Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e coorientação do Eng. Daniel Amaral Figueiredo, Administrador e Diretor do Departamento de Desenvolvimento da Palbit, Sa.

O júri

Presidente

Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva

Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, pelo constante apoio, disponibilidade, aconselhamento e ensinamentos ao longo de todo o projeto.

Um agradecimento especial ao Engenheiro Daniel Figueiredo e à Doutora Cristina Fernandes da Palbit S.A., que tornaram todo este processo possível, pelo seu constante apoio, dedicação e acompanhamento durante todo o trabalho.

Agradeço também a toda a equipa da Palbit S.A., em especial aos Engenheiros Gonçalo Oliveira, Renato Ferreira e Luís Henriques, por todo o apoio na realização dos ensaios e aos técnicos Leonardo e João por toda a ajuda prestada ao longo da realização do presente projeto.

Quero também agradecer ao Engenheiro João Pedro, investigador do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro, por se ter disponibilizado a ajudar na realização da microscopia eletrónica de varrimento.

Agradeço também ao Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro pela disponibilização dos seus equipamentos.

Um enorme agradecimento à minha namorada, Andreia, por todo o apoio, carinho e força durante todo o meu percurso académico.

Por fim um especial obrigado aos meus pais, Helena e José Carlos pelo enorme esforço, dedicação e encorajamento durante todo o meu percurso.

Palavras-chave

Micro maquinagem *laser*; Materiais ultraduros; *PCD*; Método de *Taguchi*

Resumo

A constante evolução da indústria metalomecânica em especial da maquinagem *laser* aplicada a materiais ultraduros como é o caso do diamante sintético e do nitreto cúbico de boro é um assunto de grande importância. O projeto pretende dar resposta à recente questão de como podemos melhorar os processos de maquinagem *laser* tanto a nível de qualidade de acabamento como na diminuição do tempo de maquinagem com vista a retirar maior partido da tecnologia de corte *laser* aplicada a diamantes policristalinos - *PCD* (*Polycrystalline Diamond*). O presente documento pretende otimizar a qualidade da aresta de corte da pastilha de *PCD* no menor tempo de maquinagem possível, recorrendo para tal à utilização do método de *Taguchi* aplicado aos componentes que têm maior influência, de forma a obter a parametrização ideal que mais se adequa a cada um dos componentes do processamento de corte por *laser*. Recorreu-se ao método de *Taguchi* utilizando o *software MiniTab* que permitiu otimizar os parâmetros. Foram realizados 27 ensaios de corte *laser* no sentido de se obter a aresta de corte da pastilha de *PCD* e de se caracterizar a aresta produzida. Foram introduzidos no *software* a rugosidade e o tempo de maquinagem *laser* obtidos, com diferentes configurações de parâmetros. Após a otimização procedeu-se à execução prática do novo ensaio com a parametrização otimizada. Adicionalmente foram realizados 9 ensaios de inserção de quebra-apara em pastilhas de *PCD* com o objetivo de se obter uma otimização de parâmetros no processo de ablação de quebra-aperas com recurso a tecnologia *laser*. O projeto permitiu-nos retirar conclusões sobre a velocidade linear dos eixos CNC, sobre a velocidade de pulso, a profundidade de corte e sobre a potência *laser* que devem ser utilizados nas fases de desbaste e de acabamento na operação de corte *laser* de *PCD*. Permitiu também relacionar a potência *laser* e a profundidade de corte aplicados ao processo de ablação. Conseguiu-se obter uma otimização do processo de produção em ambos os processos.

Keywords

Laser micromachining; Ultra-hard Materials; PCD; Taguchi Method

Abstract

The constant evolution of the metalworking industry, in particular the laser machining technology applied to ultra-hard materials such as synthetic diamond and cubic boron nitride is a matter of great importance. The project aims to answer the recent question of how can we improve laser machining processes in terms of finishing quality and decrease machining time in order to take full advantage of laser cutting technology applied to polycrystalline diamond. The work aims to optimize the cutting edge quality in the shortest possible time, using the Taguchi method to find out which components have the most influence and which value best suits each of the laser cutting parameters. Taguchi method was applied in the MiniTab software, which allowed to optimize the parameters. Twenty seven laser cutting tests were performed in order to obtain the cutting edge of the PCD insert and to characterize the produced edge. Roughness and laser machining time with different parameter settings were introduced in the software. After optimization, the new test was carried out with the obtained parameterization. In addition, 9 ablation tests were carried out to produce chip breakers in PCD with the objective of obtaining parameter optimization in the ablation process of chip breakers using laser technology. The project allowed us to draw conclusions about the linear speed of the CNC axes, the pulse speed, the depth of cut and the laser power to be used in the roughing and finishing phases in the PCD laser cutting operation. It also allowed to relate the laser power and depth of cut applied to the ablation process. Production process optimization was achieved in both processes.

Conteúdo

I	Enquadramento	1
1	Introdução	3
1.1	Enquadramento do projeto	3
1.2	Apresentação da instituição de acolhimento	4
1.3	Objetivos	4
2	Metal duro	7
2.1	Processamento, prensagem e sinterização	7
2.2	Propriedades mecânicas	8
3	Diamante sintético	11
3.1	Propriedades e processamento do diamante (<i>HPHT</i> ; <i>HF-CVD</i>)	12
3.2	Deposição por vapor químico de diamante	13
3.3	Diamante obtido por alta pressão e alta temperatura	14
3.4	Comparação entre o processo de retificação por mó, eletroerosão de fio e corte <i>laser</i>	17
4	Tecnologia <i>laser</i>	21
4.1	Propriedades do <i>laser</i>	22
4.2	Principais tipos de <i>laser</i>	22
4.3	Corte <i>laser</i>	24
4.4	Vantagens e desvantagens do corte por <i>laser</i>	26
4.5	<i>Laser</i> nos PCD	29
5	Método de <i>Taguchi</i>	35
5.1	Considerações sobre o método de <i>Taguchi</i>	35
II	Procedimento experimental	39
6	Procedimento Experimental	41
6.1	Preparação experimental	41
6.2	Processamento <i>laser</i>	43
6.3	Caraterização do <i>PCD</i>	48
6.4	Parametrização e comparação dos resultados	52

III Resultados, discussão e conclusão	57
7 Resultados Experimentais	59
7.1 Ensaio de corte simples	59
7.2 Ensaio de ablação	72
8 Conclusão	77
8.1 Trabalhos Futuros	78
Bibliografia	78

Lista de Tabelas

2.1	Propriedades dos compósitos WC-Co adaptado de [6] e [10].	9
2.2	Aplicações dos compósitos WC-Co adaptado de [6] e [10].	9
3.1	Propriedades gerais das estruturas de diamante adaptado de [16] e [17] . . .	12
4.1	Propriedades físicas e químicas do PCD utilizadas na experiência [11]. . . .	30
4.2	Parâmetros <i>laser</i> utilizados na experiência [11].	30
6.1	Parâmetros iniciais que influenciam o processamento <i>laser</i>	45
6.2	Parâmetros modificados que influenciam o processamento de corte <i>laser</i> . .	52
6.3	Matriz de ensaios de corte, segundo o método de <i>Taguchi</i>	53
6.4	Execução do quebra-apara de 4 parâmetros a 3 graus de liberdade.	54
6.5	Planeamento experimental do processo de ablação do quebra-apara na pastilha de <i>PCD</i>	55
7.1	Tabela com a compilação dos parâmetros de corte utilizados.	60
7.2	Tabela com a compilação dos parâmetros de corte da pastilha 0.	60
7.3	Tabela resultados da análise dos ensaios de corte.	61
7.4	Ordenação de fatores e níveis segundo <i>Taguchi</i>	63
7.5	Análise de <i>Taguchi</i> em função do tempo de maquinagem.	64
7.6	Análise de <i>Taguchi</i> segundo a otimização do valor de R_a a obter.	64
7.7	Tabela dos resultados do quociente entre o Sinal e o Ruído, para cada um dos fatores, com a combinação das variáveis de saída agregadas, tempo de maquinagem e R_a	65
7.8	Tabela dos parâmetros obtidos com recurso ao método de <i>Taguchi</i>	66
7.9	Compilação das pastilhas sujeitas a análise no perfilómetro ótico	72
7.10	Parametrização e resultados do quebra-apara.	72
7.11	Tabela comparativa dos resultados originais com a pastilha n ^o 5.	75
7.12	Compilação de fatores e níveis segundo o método de <i>Taguchi</i>	75
7.13	Tabela do quociente entre o Sinal e o Ruído para cada fator para o processo de ablação para tempo de maquinagem e profundidade de corte.	76

Lista de Figuras

2.1	Representação do processo de obtenção do metal duro [8].	8
2.2	Pastilha de metal duro [9].	8
3.1	Diamante CVD em placas à esquerda [12] e como revestimento de ferramentas de metal duro à direita [18].	13
3.2	Representação do fabrico de diamante por alta pressão e alta temperatura [12].	14
3.3	Imagem obtida por MEV do sub-microgrão de PCD, com grão fino e ampliação de 100x à esquerda e grão multimodal e ampliação de 600x à direita. Imagens adaptadas da Palbit, S.A. [18].	15
3.4	Pastilha de metal duro com retificação periférica para alocação do PCD [20].	16
3.5	Exemplos de vários tipos de aplicação dos elementos de PCD a ferramentas de corte [18].	17
3.6	Desagregação do diamante durante o processo de retificação por mó [23].	17
3.7	Comparação entre os três principais processamentos do diamante PCD. Adaptado de [25].	18
3.8	Comparação da qualidade da aresta de corte entre retificação por mó (à esquerda) e corte por <i>laser</i> (à direita). Ampliação de 32x.	19
3.9	Resultados obtidos por microscópio eletrónico de varrimento da aresta de corte de PCD, retificação por mó à esquerda e corte <i>laser</i> à direita. Grão fino na parte superior e grão grosseiro na parte inferior [21]	19
4.1	Princípio básico do corte <i>laser</i> por vaporização [32].	26
4.2	Exemplo de um quebra-apanas em <i>PCD</i> fabricado por <i>laser</i> [18].	27
4.3	Quebra-apanas encontrado numa ferramenta de torneamento [24].	28
4.4	Quebra-apanas encontrado numa ferramenta de fresagem [24].	28
4.5	Processo de corte <i>laser</i> . (a) Pastilha em bruto (b) corte do PCD com ângulo de folga de 7° (c) corte do substrato de metal duro, com o mesmo ângulo (d) geometria final da pastilha de <i>PCD</i> com ângulo de folga [42].	29
4.6	Descrição esquemática das condições de desbaste [11].	31
4.7	Comparação de parâmetros resultantes do estudo [11].	33
6.1	Processo de produção das pastilhas de metal duro adaptado de [8].	41
6.2	Imagem obtida por MEV do sub-microgrão de <i>PCD</i> utilizado no projeto, com grão fino de 6 μ m e 6% de cobalto. Ampliação de 100x [18].	42
6.3	Perfil exemplificativo de espessura de Diamante e Cobalto, num disco de PCD com espessura superior ao usado [18].	42

6.4	Processo de produção das pastilhas de <i>PCD</i> , adaptado de [50].	43
6.5	Imagem representativa da máquina de corte <i>laser</i> [51].	44
6.6	Representação da pastilha utilizada inicialmente XDHW 060210 [18].	44
6.7	Imagem da pastilha após processamento <i>laser</i> do nível 1. Imagem obtida através de microscópio ótico com ampliação de 32x.	45
6.8	Imagem da pastilha após processamento <i>laser</i> do nível 3. Imagem obtida através de microscópio ótico com ampliação de 32x.	46
6.9	Imagem da pastilha após processamento <i>laser</i> do nível 2. Imagem obtida através de microscópio ótico com ampliação de 32x.	46
6.10	Imagens obtidas em MEV com ampliação de 50x da pastilha de nível 1.	47
6.11	Imagens obtidas em MEV com ampliação de 50x da pastilha de nível 3.	47
6.12	Imagens obtidas por MEV da pastilha nível 2, ampliada a 50x.	48
6.13	Microscópio Electrónico de Varrimento, equipamento pertencente ao Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro [52].	49
6.14	Microscópio <i>Leica</i> M80 da Palbit [53].	50
6.15	Rugosímetro Tesa-Rugosurf 10G, Palbit.	50
6.16	Perfílmetro ótico da <i>Sensofar Metrology</i> , versão 6.2 [55].	51
6.17	Comparador digital ID-F - Mitutoyo [56].	52
7.1	Observação microscópica ampliada a 32x da pastilha 9.	62
7.2	Defeito na pastilha 7 com ampliação de 32x.	62
7.3	Outro exemplo de defeito na pastilha 8 com ampliação de 32x.	63
7.4	Gráfico obtido no programa <i>Minitab</i> 2018 com o resultado da otimização utilizando o método de <i>Taguchi</i>	66
7.5	Pastilha 0 pré limpeza.	68
7.6	Pastilha 14 pré limpeza.	68
7.7	Pastilha 20 pré limpeza.	69
7.8	Pastilha 33 pré limpeza.	69
7.9	Pastilha 0 pós limpeza.	70
7.10	Pastilha 14 pós limpeza.	70
7.11	Pastilha 20 pós limpeza.	71
7.12	Pastilha 33 pós limpeza.	71
7.13	Imagem da pastilha A2 após inserção do quebra-apara, ampliada a 32x no microscópio ótico, após processo de limpeza.	73
7.14	Imagem da pastilha A8 após inserção do quebra-apara, ampliada a 32x no microscópio ótico, após processo de limpeza.	73
7.15	Imagem da pastilha A5 após inserção do quebra-apara, ampliadas a 32x no microscópio ótico, após processo de limpeza.	74
7.16	Imagem da pastilha A7 após inserção do quebra-apara, ampliadas a 32x no microscópio ótico, após processo de limpeza.	74
7.17	Gráfico da análise do método de <i>Taguchi</i> aplicado ao processo de ablação, obtido através do <i>Minitab</i>	76

Parte I

Enquadramento

Capítulo 1

Introdução

Devido à globalização dos mercados, a competitividade da indústria metalomecânica impõe às empresas do setor uma constante evolução, aperfeiçoamento das tecnologias e dos recursos humanos para se ajustarem às novas necessidades dos seus clientes. O domínio das tecnologias de produção e de processos de fabrico aliados à capacidade de desenvolvimento e criação de novos produtos mais inovadores e eficientes, constituem os pilares fundamentais de sobrevivência do setor à atual competitividade do mercado.

O mercado exige uma maior flexibilidade das empresas produtoras para que tenham uma rápida reação às constantes mudanças do mesmo, exigindo sistemas de qualidade cada vez mais apertados e evoluídos, produção a preços mais competitivos e prazos de entrega cada vez mais curtos. Os desenvolvimentos tecnológicos e a inovação aliados à otimização dos recursos produtivos, quer por redução dos tempos não produtivos, quer na melhor utilização dada aos equipamentos e ferramentas disponíveis, têm possibilitado um aumento da produtividade e, conseqüentemente, um aumento da competitividade entre empresas.

1.1 Enquadramento do projeto

O surgimento no mercado de novos materiais à base de ligas de alumínio, de silício, materiais compósitos de matriz metálica, entre outros, considerados materiais abrasivos ou de maquinagem complexa para a maquinagem convencional, criou na indústria a necessidade de se encontrar alternativas aos convencionais materiais de corte, como o metal duro e os aços rápidos, com capacidade de maquinar materiais com estas características, surgindo assim materiais como o diamante policristalino (*PCD*) como elemento de corte.

As ferramentas de corte em metal duro têm vindo a dar lugar ao diamante sintético em diversas áreas de aplicação, devido à sua enorme resistência à abrasão, cerca de 500 vezes superior à do metal duro, ao maior tempo de vida útil da ferramenta, à sua capacidade de trabalho a velocidades de corte mais elevadas e à sua maior produtividade, apesar do seu custo inicial ainda ser elevado. Para além disso, o *PCD* apresenta uma dureza superior face a qualquer outro material conhecido, apresenta também maior condutividade térmica aliada a uma boa estabilidade química, apesar da sua incapacidade de maquinar materiais ferrosos. Por outro lado, um material com estas características tornar-se-ia um material de difícil produção quer pelos processos que dão origem às ferramentas *PCD*, quer no seu processo final de retificação convencional, através de mós

diamantadas ou do processamento por eletroerosão de fio.

Devido ao seu grande potencial industrial, surgiu a necessidade de redução significativa dos tempos de fabrico, de se atingir um maior grau de precisão e da produção de um melhor acabamento superficial das ferramentas em *PCD*, abrindo portas à utilização de tecnologia *laser* na retificação de ferramentas deste material.

Pretende-se com este projeto, realizado num contexto de parceria entre a Universidade de Aveiro e a empresa Palbit S.A., aumentar a eficiência do processo produtivo da micro maquinagem *laser* aplicado a pastilhas de *PCD*. Não é possível melhorar a eficiência de um processo produtivo sem um conhecimento profundo das tecnologias de base, em particular do corte por tecnologia *laser*, bem como um conhecimento dos materiais e de todo o processo de produção das pastilhas de *PCD*. Como tal, será apresentada uma bibliografia dos aspetos mais importantes a ter em consideração.

1.2 Apresentação da instituição de acolhimento

O presente projeto decorreu em ambiente industrial nas instalações da empresa Palbit, Sociedade Anónima do setor da metalomecânica, situada no concelho de Albergaria-a-Velha. Empresa fundada em 1916, na exploração mineira, assumiu o papel de produtor de ferramentas de metal duro em 1952. Tem como principais atividades o desenvolvimento, a produção e comercialização de ferramentas em metal duro, aço e materiais ultraduros (*PCD* e *CBN*). As suas principais áreas de negócio centram-se em:

- Ferramentas de corte;
- Pastilhas e peças de desgaste;
- Ferramentas de exploração mineira;

A Palbit figura procura criar ferramentas da mais alta qualidade, disponibilizando uma vasta gama de soluções para os seus clientes, fazendo-se valer da sua vasta experiência adquirida ao longo dos anos e do conhecimento da sua equipa técnica, aliando a sua capacidade de investigação e desenvolvimento, à utilização dos mais avançados equipamentos tecnológicos. Possuem um rigoroso e constante controlo de qualidade ao longo de todo o processo produtivo certificado pela norma ISO 9001:2015. A Palbit é uma empresa maioritariamente dedicada à exportação, estando presente em mais de 60 países nos principais continentes com um leque alargado de indústrias desde o setor automóvel, indústria petrolífera, indústria energética, bem como maquinagem em geral, etc...

1.3 Objetivos

O presente projeto tem como objetivo avaliar as condições de processamento e variáveis de maquinagem *laser* no processamento da face de corte bem como a realização de quebra aparta em pastilhas de *PCD*. Para tal, foram definidas etapas a concretizar para a obtenção de tais objetivos:

- Estudo bibliográfico;
- Seleção da geometria da pastilha a ser processada;

-
- Estudo comparativo dos parâmetros de corte da máquina CNC de corte *laser*;
 - Preparação e otimização dos ensaios a realizar;
 - Realização dos ensaios;
 - Análise e discussão de resultados;
 - Otimização do processamento de corte *laser*;
 - Estudo comparativo dos parâmetros de ablação;
 - Preparação e realização dos ensaios de ablação;
 - Análise e discussão de resultados
 - Otimização do processo de ablação

Capítulo 2

Metal duro

2.1 Processamento, prensagem e sinterização

Metal duro é o nome dado a uma liga de carboneto de tungstênio e um ligante normalmente metálico, com menor ponto de fusão, podendo ser níquel, crômio, titânio ou cobalto. A designação de tungstênio surge do sueco tungsten que significa *pedra pesada* embora o elemento tungstênio (W) tenha sido oficialmente descoberto em Espanha em 1783 [1]. O carboneto de tungstênio (WC) foi descoberto um pouco mais tarde em 1896, por Henri Moissan que ao fazer reagir o ácido túngstico com o carboneto de cálcio, num forno eléctrico, descobriu o carboneto de tungstênio (WC) [2]. O carboneto de tungstênio é um material muito denso e muito duro, muito apreciado para a fabricação de equipamentos, ferramentas, peças de desgaste e para algumas aplicações militares, porém bastante frágil. [1]. O material de carboneto de tungstênio ligado com cobalto, vulgo metal duro, foi patenteado em 1923 por K. Schröter [2], após descobrir que a ligação do cobalto ao carboneto de tungstênio aumentava a resistência à fratura e à fissuração [3].

O metal duro é obtido por prensagem e sinterização de uma mistura de pós de carboneto de tungstênio e de cobalto, metal com menor ponto de fusão que serve de ligante aos dois materiais [4]. Após a obtenção da mistura dos dois elementos, o composto é prensado, adquirindo assim uma forma semelhante à fase final. O material passa depois pelo processo de sinterização, que consiste no aquecimento até ao ponto de fusão do metal ligante, neste caso o cobalto, preenchendo os espaços vazios existentes entre os grãos de carboneto de tungstênio [5], conferindo assim as propriedades que caracterizam este material. Na figura 2.1 pode observar-se uma representação esquemática do processo de obtenção da pastilha de metal duro, observando-se na figura 2.2 a pastilha no seu estado final de acabamento.

O carboneto de tungstênio é responsável por propriedades como a dureza e a resistência mecânica ao desgaste, apresentando no entanto baixa resistência à fratura e fissuração [3]. Necessita, por isso, da adição de ligantes metálicos, como o cobalto, que têm como finalidade a obtenção de materiais com propriedades mecânicas superiores, como elevada resistência ao desgaste por abrasão e elevada resistência à compressão, favorecendo a densificação do compósito, conferindo tenacidade e resistência ao material compósito [6]. Em relativamente pouco tempo, o metal duro tornou-se um material com inúmeras aplicações industriais, tais como: ferramentas de corte e retificação, componentes de máquinas industriais, queimadores de gás resistentes à oxidação, entre outras aplicações.

Durante o processo de sinterização a uma temperatura de aproximadamente 1400 °C, obtém-se uma distribuição homogênea da fase ligante, devido à boa molhabilidade das partículas de WC pelo cobalto líquido e pela baixa viscosidade desta fase líquida [7].



Figura 2.1: Representação do processo de obtenção do metal duro [8].



Figura 2.2: Pastilha de metal duro [9].

2.2 Propriedades mecânicas

No decorrer da sinterização existe uma redução do volume, originada pela contração do material, resultando um material compósito com elevada dureza entre os 1000 e os 1800 HV, dependendo da percentagem de cobalto na mistura e do tamanho de grão utilizado. Quanto menor o teor de ligante e mais reduzido o tamanho do grão, maior será a sua dureza. Por outro lado, se o objetivo for obter maior tenacidade, utiliza-se maior teor de ligante e um maior tamanho de grão. As ferramentas de corte, em que a propriedade desejada é elevada dureza, contêm teores de cobalto inferiores a 5%. Já em aplicações onde a resistência ao impacto seja vital é necessário haver uma redução da dureza para se conseguir um ganho de tenacidade. Dependendo da aplicação, o teor de ligante pode chegar a 50% ou até em alguns casos aos 70%. A tabela 2.1 apresenta de forma sintetizada as propriedades dos compósitos de carboneto de tungstênio nas

variantes mais comuns. As várias aplicações do metal duro, como se pode ver na tabela 2.2, devem-se ao facto deste material possuir uma combinação de alta resistência ao desgaste e grande resistência à compressão. A densidade do metal duro é bastante alta, podendo atingir o dobro do peso específico em relação ao aço [7].

Tabela 2.1: Propriedades dos compósitos WC-Co adaptado de [6] e [10].

Composição [%]		Densidade	Dureza	Resistência à rotura	Módulo de
Wc	Co	[g/cm ³]	[HV]	transversa [MPa]	elasticidade [GPa]
100	-	15,7	2000	500	722
97	3	15,1	1740	1440	670
94	6	14,8	1585	2070	630
91	9	14,5	1470	2680	590
85	15	13,8	1150	3070	540
80	20	13,1	1000	3380	500
-	100	8,7	125	-	180

Tabela 2.2: Aplicações dos compósitos WC-Co adaptado de [6] e [10].

Grupo	Composição [%]	Aplicações
I	97-94 WC, 3-6 Co	Maquinagem e corte de materiais metálicos e não metálicos
II	94-85 WC, 6-15 Co	Materiais resistentes ao desgaste, moldes e ferramentas para a indústria mineira
III	80-70 WC, 20-30 Co	Ferramentas sujeitas a elevados impactos como estampagem a frio, enformação, feiras de extrusão

Capítulo 3

Diamante sintético

Diamante sintético é o nome dado ao diamante que é produzido de forma artificial contrariamente ao diamante natural que é produzido por fenômenos geológicos. O diamante sintético tem propriedades altamente atraentes como extrema dureza, alta resistência à fratura, alto grau de inércia química, elevada condutividade térmica e resistência ao desgaste, sendo por isso um material muito adequado para aplicações em ferramentas de corte. É amplamente utilizado em ferramentas de maquinagem de vidros, materiais compósitos, furações de petróleo, explorações de gás, entre outras aplicações. Uma das maiores desvantagens do diamante prende-se com a sua degradação térmica a temperaturas superiores a 600 °C, quando exposto a atmosfera oxidante [11].

A criação de diamante sintético pode ser feita usando duas técnicas: através de alta pressão e alta temperatura (*HPHT-High Pressure and High Temperature*) ou por deposição de vapor químico (*CVD-chemical vapour deposition*). Após 1797, ano em que se descobriu que o diamante era composto por átomos de carbono agregados de forma cúbica, existiram várias tentativas de reproduzir a produção de diamante de forma artificial mas só em 1879, *James Ballantyne Hannay* conseguiu obter diamante sintético através da transformação da grafite em diamante pelo processo de alta pressão e alta temperatura (*HPHT-High Pressure and High Temperature*) [12]. Na década de 1950, deu-se início a diversas pesquisas na União Soviética e nos Estados Unidos da América sobre o crescimento de diamante por pirólise de gases de hidrocarbonetos a temperaturas de cerca de 800 °C. Este processo de baixa pressão é conhecido como deposição de vapor químico (*CVD-chemical vapour deposition*). *William G. Eversole* alcançou, em 1962, a deposição de vapor de diamante sobre substrato de diamante monocristalino [13].

Em 1970 *Deryagin e Fedoseev* [14] conseguiram obter filmes de diamantes sob substrato de materiais que não são diamantes, como o caso do silício e substratos metálicos, o que levou a uma pesquisa massiva sobre revestimentos de diamantes substancialmente mais baratos durante a década de 80 [15]. O diamante sintético é muitas vezes denominado pelo processo que lhe dá origem, ou seja diamante *HPHT* obtido por alta pressão e alta temperatura ou diamante *CVD* quando obtido por deposição de vapor químico [12].

3.1 Propriedades e processamento do diamante (*HPHT; HF-CVD*)

A elevada dureza do diamante sintético, superior a 5000 HV confere uma resistência ao desgaste por abrasão elevada por esta razão é o material escolhido para a fabricação de mós e *tips* de diamante para pastilhas de corte. A sua estrutura cristalina resulta de arranjos cúbicos de faces centradas com orientação desordenada, por forma, a evitar a propagação de uma fratura em qualquer direção. Os *tips* de diamante são brasados em pastilhas de metal duro, conferindo uma maior resistência ao choque. As principais características do diamante sintético, são [12]:

- Elevada dureza (resistência ao desgaste);
- Boa tensão de rotura transversal;
- Elevada condutibilidade térmica (evacuação do calor);
- Baixo coeficiente de dilatação térmico;
- Afinidade química com metais ferrosos (perigo de formação de grafite).

As duas últimas características do diamante limitam a sua aplicabilidade em operações de maquinagem de materiais ferrosos devido à reatividade química do diamante com esses materiais. As elevadas temperaturas na aresta de corte da ferramenta podem levar a que exista o processo de grafitização que consiste na transformação da estrutura do diamante na estrutura de grafite, em que existe a perda total das propriedades do diamante e passa a existir grafite amorfa. Por outro lado, é uma boa escolha para a maquinagem de materiais não ferrosos, como ligas de Alumínio, de Silício e em especial de materiais abrasivos [16]. A tabela 3.1 sintetiza as principais propriedades que caracterizam cada tipo de diamante.

Tabela 3.1: Propriedades gerais das estruturas de diamante adaptado de [16] e [17]

Propriedades	<i>CVD</i>	<i>CVD</i>	<i>HPHT</i>
	<i>Monocristalino</i>	<i>Policristalino</i>	<i>Policristalino</i>
Dureza (GPa)	50-100	13.65	
Máx. Temperatura de trabalho (°C)	600	600	600
Tenacidade à Fractura (MPa/m ²)	3,4	5,5-8,5	7-9
Módulo de Young (GPa)	1000-1100	1000-1100	900-950
Tensão de Rotura (GPa)	1050-30000	900-1300	300-1500
Tensão de Rotura transversa (GPa)	2,9	1,3	0,5-1,0
Tensão de Compressão (GPa)	9	9	1,9-4,7

Quando o critério fundamental é boa precisão dimensional e bom acabamento superficial, é a melhor opção para materiais compósitos de matriz metálica, plásticos reforçados, cerâmicos, metais duros sinterizados, ligas de Cobre e Zinco ou fibras sintéticas como a fibra de vidro ou fibra de carbono. As ferramentas em diamante sintético têm um tempo de vida útil substancialmente superior às ferramentas de corte convencionais, existindo também ferramentas de metal duro com revestimento de diamante sintético através da técnica de CVD que alcançam um tempo de vida intermédio. Os diamantes obtidos por

HPHT-alta pressão e alta temperatura são realizados a 5 GPa e 1500 °C ao passo que os diamantes sintetizados por deposição de vapor químico são formados a 800 °C e a pressão inferiores à atmosférica [16].

3.2 Deposição por vapor químico de diamante

Os diamantes sintéticos monocristalinos e policristalinos obtidos por deposição em fase de vapor (*Chemical Vapour Deposition-CVD*) de carbono num substrato metálico, são controlados de forma a serem obtidos de forma consistente e previsível com as propriedades que os caracterizam tais como [16]:

- Espectro de transmissão extremamente amplo de 220 nm até 50 μm ;
- Alta condutividade térmica superior a 2000 W/mK;
- Elevada dureza sendo superior ao diamante obtido por alta pressão e alta temperatura;
- Quimicamente inerte passível de aplicar em ambientes corrosivos;
- Baixa dispersão luminosa.



Figura 3.1: Diamante CVD em placas à esquerda [12] e como revestimento de ferramentas de metal duro à direita [18].

A deposição em fase de vapor é conseguida através da utilização de uma câmara de vácuo a pressões mais baixas que a atmosférica e aquecida até aos 800 °C onde se introduz gases, normalmente metano e hidrogénio que reagem entre si causando a deposição do carbono sobre o substrato metálico formando uma película fina de diamante monocristalino, de um único diamante, ou policristalino aglomerando de vários cristais de diamante. O diamante obtido por deposição de vapor químico (*CVD*) é superior ao diamante policristalino (*PCD*), obtido por alta pressão e temperatura, em muitas características tais como dureza, condutividade térmica e módulo de *Young*. Além disso, o diamante *CVD* pode atingir um raio da aresta de corte mais reduzido do que o *PCD* (*HPHT*). No entanto, é mais difícil processar mecanicamente o diamante *CVD* devido à sua extrema dureza. O diamante *CVD* pode ser utilizado como uma placa de diamante sintético com alta pureza ou como revestimento de ferramentas de corte, mós entre outras aplicações. Podemos ver exemplos destas aplicações na figura 3.1 [12].

3.3 Diamante obtido por alta pressão e alta temperatura

O diamante obtido por alta pressão e alta temperatura (*HPHT-High Pressure and High Temperature*) pode produzir diamantes sintéticos monocristalinos (*SCD-Single crystal Diamond*) ou policristalinos (*PCD-Policristaline Diamond*). O diamante policristalino obtido por alta pressão e alta temperatura é o diamante com maior utilização e em maior expansão no mundo industrial. O diamante policristalino obtido por *HPHT* é vulgarmente designado apenas por *PCD* e assume um bom compromisso entre o diamante monocristalino (*SCD*) e o diamante *CVD* por se tratar de um diamante com uma dureza inferior aos restantes permitindo assim uma maior maquinabilidade do diamante. O Diamante policristalino (*PCD*) pretende responder às exigências da indústria de precisão de corte, processamento de materiais abrasivos, exploração de petróleo, de gás, entre outras.

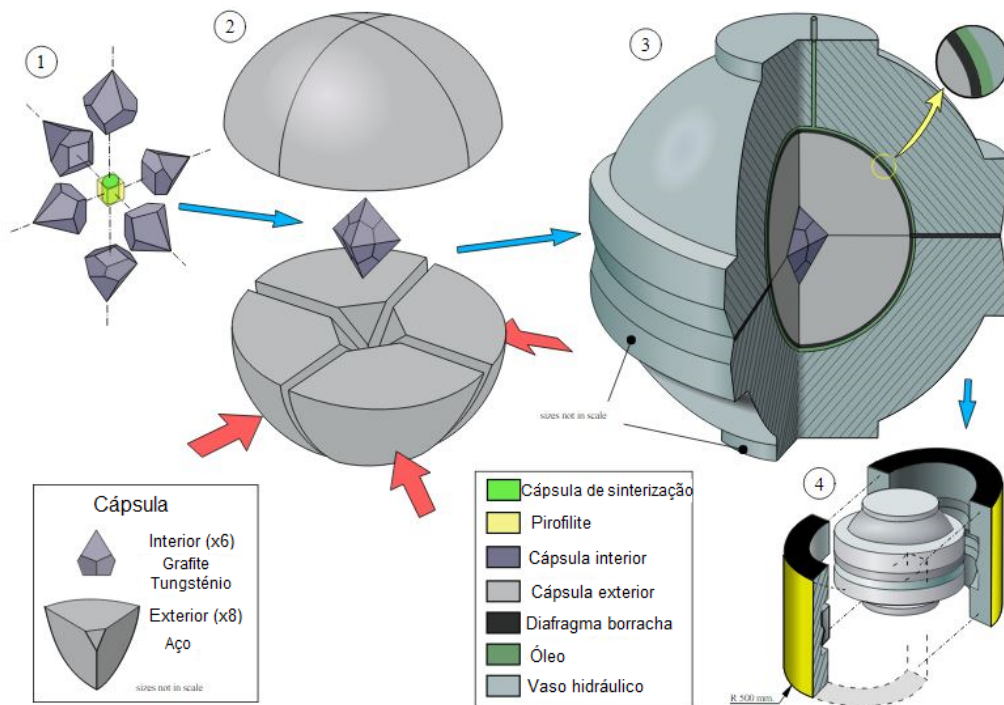


Figura 3.2: Representação do fabrico de diamante por alta pressão e alta temperatura [12].

O *PCD* consiste em pós de diamante sintético de tamanho micrométrico sinterizados a altas pressões e altas temperaturas de forma a criarem uma estrutura com maior dimensão. O diamante monocristalino apresenta diferentes propriedades em diferentes planos e direções cristalográficas, ao passo que a forma policristalina é isotrópica, exibindo propriedades uniformes em todas as direções e planos [16]. O Diamante obtido por alta pressão e alta temperatura é produzido sob um substrato de carboneto de tungstênio e cobalto, que serve como uma fonte de catalisador de metal solvente para auxiliar a sinterização. Sob extremas pressões e temperaturas, o cobalto do substrato de carboneto cimentado infiltra-se através da dos grãos de diamante, fazendo com que os grãos vizinhos cresçam interligados dentro da cápsula de sinterização como ilustrado na figura 3.2.

Não só o pequeno resíduo de cobalto proporciona uma muito maior coesão e tenacidade ao compósito, como também torna o material eletricamente condutor, tornando possível a maquinagem por eletroerosão. O substrato de carboneto integralmente ligado também torna o compósito brasável, outro atributo crítico, dado que a maior parte de uma ferramenta de corte é constituída por metal duro e usada exclusivamente para suporte, com o *tip* de *PCD* brasado apenas na zona onde se realiza o corte. O diamante policristalino pode ser facilmente encontrado no mercado com diferentes composições químicas, as mais comuns [19]:

- 88% Diamante e 12% de Cobalto com tamanho de grão multimodal de 2 até 30 μm ;
- 92% Diamante e 8% de Cobalto com tamanho de grão 25 μm ;
- 93% Diamante e 6 a 7% de Cobalto com tamanho de grão de 6 μm .

A figura 3.3 apresenta uma comparação, obtida por Microscópio Eletrónico de Varriamento (MEV) com ampliação de 100x, de dois tipos de diamantes, à esquerda diamante de grão fino de 6 μm e 6% de Cobalto enquanto à direita podemos observar diamante com grão multimodal de 2 a 30 μm . No caso do *PCD*, as propriedades do compósito podem ser projetadas parcialmente modificando o tamanho dos grãos de diamante sintéticos constituintes assim como a sua percentagem de cobalto. À medida que o tamanho do grão aumenta, aumenta também a resistência ao desgaste embora à custa da diminuição da dureza e da menor qualidade da aresta produzida, como podemos observar no rodapé da figura 3.3.

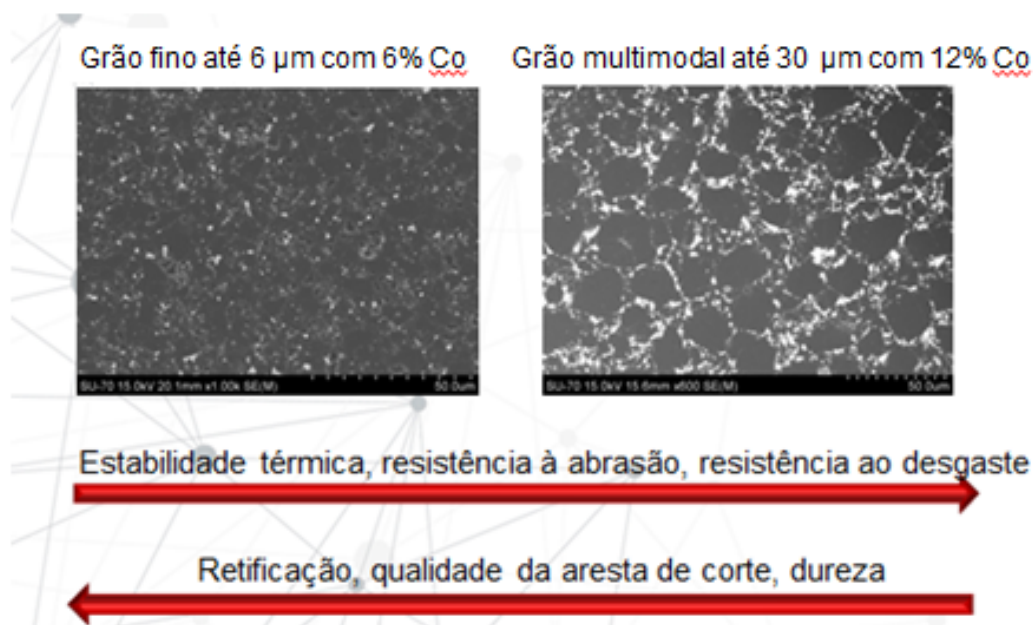


Figura 3.3: Imagem obtida por MEV do sub-microgrão de *PCD*, com grão fino e ampliação de 100x à esquerda e grão multimodal e ampliação de 600x à direita. Imagens adaptadas da Palbit, S.A. [18].

Ao reduzir o tamanho do grão a poucos micrómetros, a resistência ao desgaste e a força podem ser aumentadas para além do que é possível com materiais ligeiramente mais grosseiros. Os materiais de tamanho de grão mais finos são mais fáceis de triturar mecanicamente ou com recurso à eletroerosão e fornecem um melhor acabamento superficial da peça para aplicações que exijam maquinagem de precisão. Distribuição de tamanho de grão multimodal de tamanho grosso e fino, não apresentam as desvantagens dos materiais de grão grosso, apresentando boa dureza e boa qualidade de aresta de corte. Um dos aspetos que diferencia os vários tipos de *PCD* é a percentagem de cobalto presente, quanto maior percentagem de cobalto maior a resistência à fratura mas em compensação maior será o desgaste na face de corte.

O diamante como material de ferramenta é frequentemente utilizado como camada de revestimento aplicado em padrões aleatórios na superfície da ferramentas de retificação por mó com arestas de corte indefinidas, sendo que a sua utilização em ferramentas de corte é desaconselhada uma vez que ocorre rápida delaminação do revestimento o que leva a uma falha da mesma.

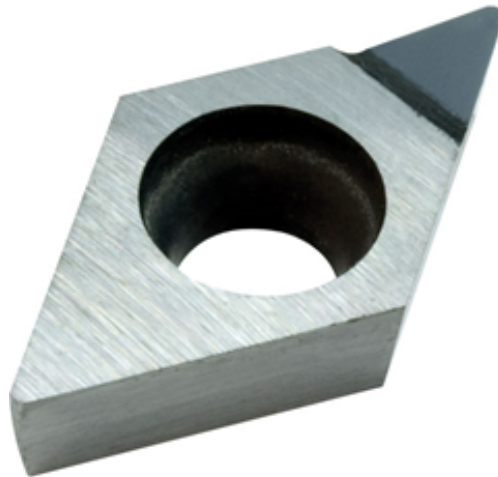


Figura 3.4: Pastilha de metal duro com retificação periférica para alocação do PCD [20].

Quando são necessárias arestas de corte definidas são utilizados materiais como placas de *CVD* ou de diamante policristalino (*PCD*) por serem mais adequados e mais vantajosas do que ferramentas revestidas. Estas ferramentas são constituídas na sua grande parte por metal duro contendo apenas na zona de corte (ponta da ferramenta) um *tip* de *PCD* ou *CVD*. O processo de realização do metal duro é em tudo semelhante ao descrito no capítulo 2, à exceção da retificação periférica, onde se realiza também a alocação correspondente ao *tip* de diamante como mostra a figura 3.4.

O *tip* de *PCD* sofre retificação periférica plana no substrato de metal duro para as medidas pretendidas de 1 mm de espessura. Após retificação periférica, os dois elementos são ligados por brasagem que consiste num processo a vácuo e a uma temperatura de cerca de 800 °C durante um período de aproximadamente 40 min para que os dois materiais fiquem soldados, resultando em diversos tipos de ferramentas como ilustra a figura 3.5.

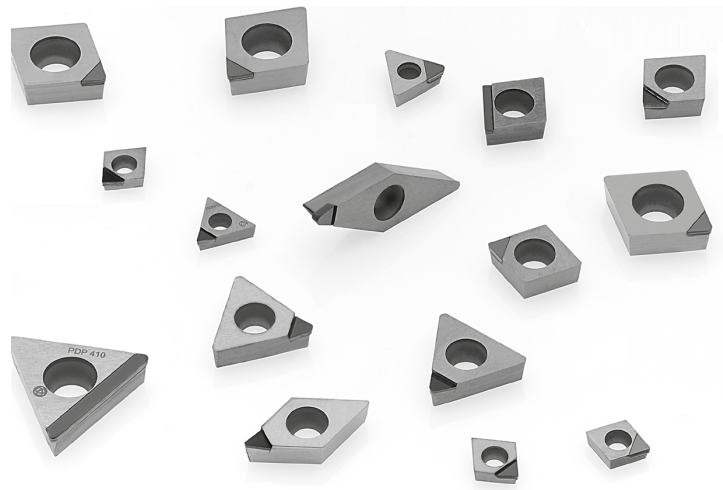


Figura 3.5: Exemplos de vários tipos de aplicação dos elementos de PCD a ferramentas de corte [18].

3.4 Comparação entre o processo de retificação por mó, eletroerosão de fio e corte *laser*

As propriedades mais importantes das ferramentas de corte são a rugosidade superficial e o raio da aresta de corte, que se deve situar abaixo de $6 \mu\text{m}$ de forma a realizar o corte de materiais não ferrosos e materiais compósitos de difícil maquinabilidade sem deixar rebarbas ou imperfeições, bem como a sua capacidade de manter as condições de corte constantes ao longo da vida útil da ferramenta. O processamento convencional do diamante é feito por retificação por mó ou eletroerosão de fio (EDM)[21].

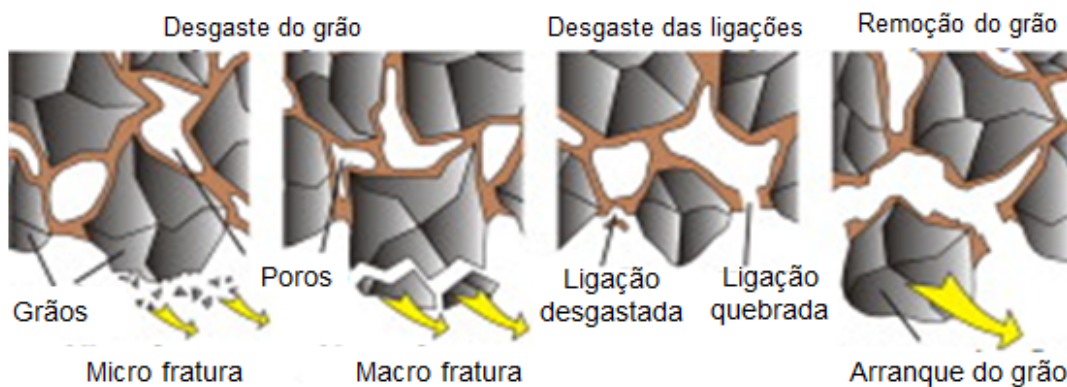


Figura 3.6: Desagregação do diamante durante o processo de retificação por mó [23].

Retificação por mó é o processo que economiza mais tempo, sendo a eletroerosão de fio o processo com melhor precisão dos métodos convencionais. A retificação por mó é o processo mecânico que obtém os piores resultados de qualidade da aresta de corte do *PCD* por ser um processo mecânico de desgaste que muito facilmente retira por completo os grãos de diamante provocando a existência de várias crateras na aresta de corte, como podemos ver na figura 3.6, originando um mau acabamento da peça maquinada, por

comparação com os restantes processos.

A eletroerosão por fio é um processo que necessita de um elemento condutor, neste caso o cobalto, para provocar o corte na face de corte da pastilha, como tal, no *PCD* com baixa percentagem de cobalto, torna-se menos eficaz e nalguns casos, chega mesmo a não atravessar o grão de diamante resultando num acabamento superficial ligeiramente irregular e com rugosidade superficial considerável [21].

O processamento a *laser* é uma abordagem fundamentalmente diferente porque possibilita o corte através dos grãos de diamante, em vez de quebrar ou remover mecanicamente a totalidade do grão do diamante como na retificação por mó, resultando num acabamento com melhor qualidade, mais limpo e mais regular que os anteriores e com taxas de remoção de material superiores à eletroerosão [22]. Uma das grandes vantagens deste processo prende-se com o facto de permitir a criação de geometrias 3D, como por exemplo o quebra-apara, que só era possível realizar com eletroerosão mas era economicamente inviável [24].

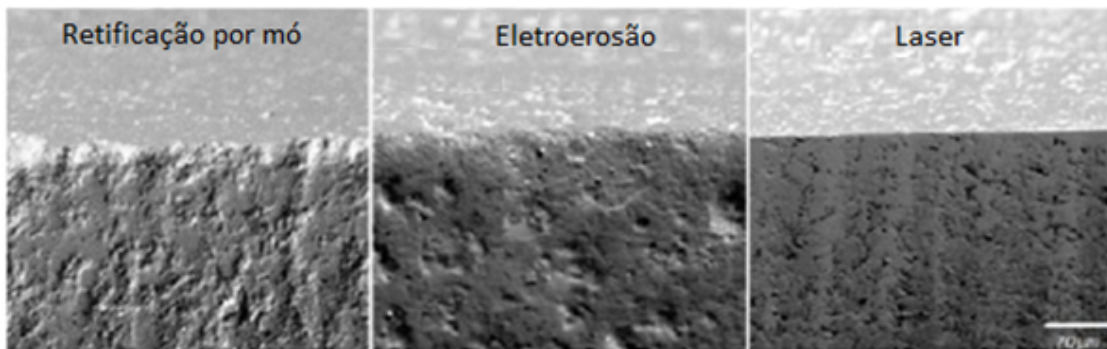


Figura 3.7: Comparação entre os três principais processamentos do diamante PCD. Adaptado de [25].

A figura 3.7 compara os resultados obtidos de cada um dos processamentos de PCD descritos, onde podemos facilmente comprovar que a qualidade da aresta é superior no processamento a *laser* por comparação com os demais. Na figura 3.8 podemos observar a comparação de 2 pastilhas processadas na Palbit como um exemplo do resultado final obtido em pastilhas de PCD, à esquerda a pastilha que sofreu retificação por mó, onde são evidentes crateras junto à aresta de corte e à direita, a pastilha retificada através de corte *laser*, onde não ocorre a formação de crateras.

A figura 3.9 apresenta uma imagem obtida por Microscópio eletrónico de varrimento da comparação entre a retificação por mó e a retificação por corte *laser* utilizando diamante de grão fino bem como diamante de grão grosso para se averiguar se o tamanho de grão influenciava significativamente o resultado obtido nos diferentes processamentos.

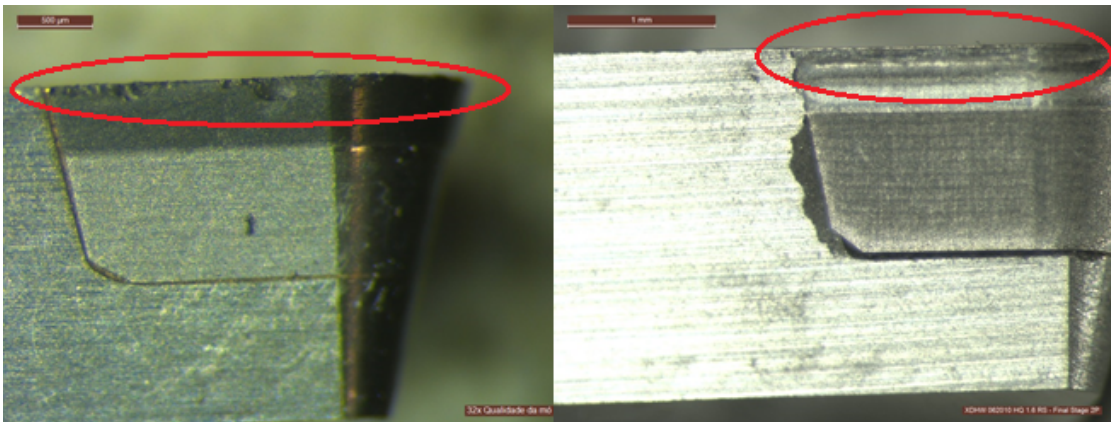


Figura 3.8: Comparação da qualidade da aresta de corte entre retificação por mó (à esquerda) e corte por *laser* (à direita). Ampliação de 32x.

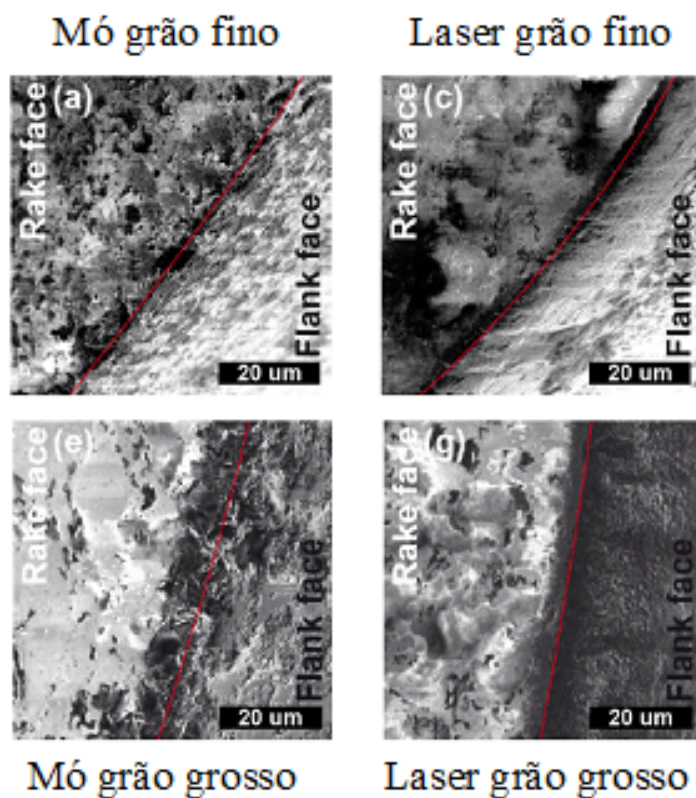


Figura 3.9: Resultados obtidos por microscópio eletrónico de varrimento da aresta de corte de PCD, retificação por mó à esquerda e corte *laser* à direita. Grão fino na parte superior e grão grosseiro na parte inferior [21]

Capítulo 4

Tecnologia *laser*

Laser: Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation, ou seja amplificação da luz por emissão estimulada de radiação trata-se de um aparelho que emite radiação monocromática, com comprimento de onda bem definido e com um feixe de luz colimado praticamente perfeito. O *laser* teve a sua primeira aparição física em 1960 através do físico *Theodore Harold Maiman* que criou um *laser* em que utilizava um cristal de rubi como meio ativo [26]. Para que o *laser* seja produzido é necessário emitir fótons estimulados que vão interagindo com outros elétrons. O *laser* é produzido através de uma cavidade ótica, ou seja uma região do espaço em que se confina luz por algum tempo com o recurso a espelhos refletores convenientemente alinhados que vão refletindo várias vezes os fótons. Num dos espelhos existe um pequeno orifício por onde alguns fótons depois de muitas vezes refletidos conseguem sair emitindo o feixe colimado de luz. O *laser* produz um feixe de luz extremamente coerente, em que todas as ondas se encontram na mesma fase, focalizado (praticamente paralelo) e puro. A quantidade de energia que se encontra armazenada no material gerador é o que determina se o raio *laser* será mais fraco, como o produzido pelos apontadores muito utilizados p.e. em palestra, pelos leitores de código de barra ou de maior potência, capazes de cortar barras de aço e diamante e ainda mais potentes para aplicações militares [27]. O corte por *laser* é a aplicação mais amplamente implementada, da área *laser*, na indústria oferecendo várias vantagens em relação aos métodos de corte convencionais, como corte por plasma, eletroerosão, oxi-combustível, entre outros.

As vantagens do corte a *laser* incluem alta produtividade graças às altas velocidades de corte, largura de corte reduzida (perda mínima de material), baixa rugosidade da superfície cortada, arestas de corte bem definidas, mínimas zonas afetadas termicamente, fácil integração em máquinas controladas numericamente por computador (*CNC*), alto grau de repetibilidade e sendo um processo sem contacto, não existe desgaste de componentes tornando-se adequado para o corte em áreas de acesso difícil ou limitado.

O *laser* de CO_2 , o *laser Neodymium-doped yttrium Aluminum Nd:YAG* (*laser* em estado sólido) e o *laser* de fibra ótica são os *laser* mais utilizados industrialmente. O *laser* CO_2 é o mais amplamente utilizado devido à sua maior capacidade de corte para espessuras maiores bem como por ter maiores taxas de remoção de material, conseguido através da extração de maior potência do feixe [28]. O *laser Nd:YAG* apesar de perder qualidade à medida que se aumenta a potência extraída, tem vindo a ganhar maior importância para aplicações em que são necessários pulsos de onda curtos e ultra curtos da ordem dos nano a femtosegundos.

4.1 Propriedades do *laser*

Monocromático

A luz comum é composta por diferentes frequências, fases e polarizações contrariamente à luz *laser* que é um tipo particular de luz caracterizada pela sua luz monocromática. Monocromático significa que o feixe de luz produzido é constituído por um único comprimento de onda de uma única cor. Apesar de nenhuma fonte de luz ser totalmente monocromática, o *laser* é o que mais se aproxima desta característica devido aos princípios físicos envolvidos na produção do feixe de luz [28]. Como referido anteriormente o feixe do *laser* é constituído por ondas com o mesmo comprimento de onda, tendo origem no processo de emissão estimulada de luz. O dispositivo *laser* é constituído por um arranjo de espelhos que formam um ressonador, onde só é permitida a oscilação com a frequência da cavidade do ressonador. Esta única frequência de oscilação tem como consequência a emissão de radiação de um quase único comprimento de onda dando assim a característica de altamente monocromática ao feixe de luz produzido [29].

Coerência

A luz emitida por um *laser* é caracterizada por ser coerente porque as ondas se encontram em fase umas com as outras, como resultado do processo de emissão estimulado [30]. Existem dois tipos de coerência, temporal e espacial. Temporal também conhecida como coerência longitudinal é caracterizada como a correlação da fase da onda num determinado ponto alcançado pela mesma em dois instantes de tempo diferentes. Uma maior coerência temporal significa maior grau de monocromaticidade. Por outro lado coerência espacial mede a correlação entre a relação de fase definida entre pontos distintos de uma secção transversal de um feixe luminoso. Coerência espacial permite que o feixe de luz percorra centenas de quilómetros divergindo apenas poucos metros [31].

Direção e divergência

O feixe de luz é altamente direcionado. Esta propriedade deriva do facto de que a cavidade do *laser* é praticamente paralela entre os espelhos, restringindo o feixe de luz final a um percurso perpendicular aos espelhos. O grau de divergência do *laser* devido à difração da luz pode ser calculado através da equação 4.1

$$\Theta = \frac{\lambda_0}{\pi * w_0} \quad (4.1)$$

Onde λ_0 é o comprimento de onda W_0 é o tamanho do feixe *laser*. A baixa divergência e o paralelismo do feixe de luz *laser* permitem ao feixe ficar focado para diâmetros muito pequenos [28].

4.2 Principais tipos de *laser*

Laser a gás

Um *laser* a gás é um *laser* que descarrega energia elétrica no interior da cavidade do *laser* onde está confinado o gás de modo a produzir o feixe luminoso. No *laser* a gás, o

seu interior é composto por um ou mais gases. Esta mistura de gases é compartimentada no interior de um tubo de vidro e atua como o corpo do *laser*. Este *laser* foi o primeiro a utilizar o princípio de conversão de energia elétrica em energia luminosa. Existem vários tipos de *lasers* de gás: Hélio (He), Neon (Ne), íões de argon (Ar), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), Azoto (N), Hidrogénio (H_2), etc. O tipo de gás utilizado define o comprimento de onda e a eficiência do feixe obtido. Por exemplo o *laser* de CO_2 emite uma radiação infravermelha com um comprimento de onda de $10,6 \mu\text{m}$ e tem uma eficiência inferior a 10%, os mais comuns de apenas 5%. A limitação da eficiência prende-se com as altas temperaturas atingidas no interior do *laser* que necessitam de arrefecimento eficiente para aumentarem a eficiência [32]. Comparado a outros tipos de *laser*, a alta potência do *laser* de CO_2 permite processar metais com taxas de remoção de material altas para diferentes tipos de aplicações industriais. Para excitar as moléculas do gás, o dióxido é misturado com o nitrogénio e com hélio o qual aumenta a sua condutividade térmica. A transição entre moléculas de CO_2 energeticamente excitadas para o nível de baixa energia é conseguido através da emissão de um fóton que produz a emissão de um feixe de luz [33].

Laser estado sólido

Os *lasers* de estado sólido são assim chamados por serem constituídos por vidro ou materiais cristalinos (como por exemplo rubi) e no seu interior são colocados íões. Estes íões podem ser de Cério (Ce), Erbium (Eu) ou Terbium (Tb) enquanto que o material que os recebe pode ser safira (Al_2O_3), *Neodymium-doped yttrium aluminum garnet (Nd:YAG)*, *Neodymium-doped glass (Nd glass)*, sendo o *Nd YAG* o mais utilizado. Nestes *lasers*, a fonte utilizada é a energia luminosa tais como luzes flash, lâmpadas de arco ou *lasers* de díodos para conseguir o feixe luminoso. Os *lasers* que utilizam como fonte de energia lâmpadas flash (luz pulsada) são normalmente preenchidos com *Krypton* ou gás *xénon*. Este tipo de lâmpadas é preparado especificamente para operar de forma repetitiva com pulsos de elevado pico de corrente elétrica. A escolha do gás que preenche o *laser* é escolhida de acordo com o espectro de luz que se pretende obter do *laser* [28]. Os *lasers* que utilizam luz contínua, com lâmpadas de arco, usam os mesmos gases (*Krypton* e *Xénon*) mas requerem uma fonte de energia mais potente devido ao baixo fluxo de fótons o que obriga a melhorar o nível de arrefecimento das lâmpadas. Este tipo de fontes de lâmpadas está a ser substituído por *lasers* de díodos que emitem uma luz *laser* intensa num espectro de poucos nanómetros que corresponde ao espectro de absorção ótimo dos cristais de *Nd:YAG*. Outro ponto favorável a este tipo de fonte é a sua alta expectativa de vida, aliada à baixa necessidade de arrefecimento, diminuindo assim o seu peso e volume [34].

Laser de fibra ótica

Os *lasers* de fibra ótica utilizam *lasers* de díodos e fibra ótica como meio condutor de luz. No interior da fibra ótica são colocados elementos como *Erbium (Er)*, *neodymium (Nd)* e *Ytterbium (Yb)*, sendo este último o mais utilizado como elemento ativador do *laser* [28]. Devido às várias camadas da fibra ótica o feixe de luz é repetidamente refletido para o núcleo da fibra ótica onde se encontra o gás ativador do *laser* que atua como ressonador e onde se procede à emissão do feixe de luz *laser*.

Uma outra vantagem deste tipo de *laser* recai sobre a refrigeração que é bastante menor que nos casos anteriores e em que o ar ambiente é normalmente suficiente para refrigerar o *laser* [35]. As principais vantagens dos *lasers* de fibra ótica são o seu design compacto, alta qualidade de feixe luminoso, capacidade de gerar pulsos de *laser* ultra curtos com uma eficiência de saída relativamente alta de cerca de 50%, quando comparados aos *lasers* de CO_2 e *Nd YAG* e com uma manutenção reduzida ou inexistente durante vários anos [36]. O *laser* pode ser utilizado em diversas áreas tais como:

- Área médica (cirurgia corretiva da córnea, cirurgia plástica, área cardíaca, etc.);
- Área dentária (cirurgia orto-dentária);
- Aplicações militares (localizar satélites a longas distâncias, orientar mísseis, etc.);
- Informática (armazenamento de dados informáticos em CD, DVD, etc.);
- Comunicação (transmissão por fibra ótica, leitura de códigos de barra, etc);
- Lazer (*laser tag*, apontadores *laser*);
- Industrial (corte de metais duros, diamantes, corte de precisão, soldadura, marcação, perfuração, metrologia, impressão *laser*, entre muitas outras aplicações).

4.3 Corte *laser*

O processo de corte *laser* é conseguido através da alta temperatura alcançada, provocado por um feixe de luz focado na superfície da peça a processar, resultando em fusão e evaporação do material. É frequentemente utilizado um gás inerte, injetado coaxialmente ao feixe do *laser* que ajuda a remover as aparas de material de forma rápida e eficientemente. Existem três processos padrão de corte a *laser*, definidos de acordo com o seu processo de transformação dominante sendo eles: o corte por oxidação, o corte por fusão e o corte por vaporização. Estes métodos de corte são aplicáveis para o corte de diferentes materiais na indústria.

Corte *laser* por oxidação

O corte por oxidação a *laser*, também chamado de corte por oxigénio a *laser* ou corte a *laser*, usa oxigénio como gás de corte. Neste processo, a remoção de material é efetuada por meio da reação química do oxigénio com o metal base. A reação exotérmica do oxigénio com o material que suporta o processo de corte a *laser*, fornece uma entrada de calor adicional, resultando em menor energia fornecida ao *laser* para o processo de corte. No corte por oxidação, uma pequena área do material é pré-aquecida com oxigénio e um gás combustível utilizado na ignição da reação de oxidação do material da peça de trabalho. Em seguida, um pequeno fluxo de oxigénio puro é direcionado para a área aquecida. O oxigénio rapidamente oxida o material da peça de trabalho numa secção estreita (*o kerf*) à medida que o óxido fundido e o metal são removidos pela energia cinética da corrente de oxigénio [32]. Para além disso, a formação de uma camada de óxido na aresta de corte aumenta a absorção da radiação *laser*, quando comparada com a absorção do metal fundido puro. Como consequência da menor necessidade de energia

para o corte por oxidação, o corte de peças de trabalho mais espessas é conseguido (até 40 mm), bem como maiores velocidades de corte são alcançadas, no entanto as arestas que sofrem corte ficam oxidadas. O corte por oxidação é normalmente usado para cortar aços suaves e de baixa liga [37].

Corte *laser* por fusão

No corte por fusão a *laser*, o material retirado é transformado predominantemente no estado fundido e atirado para fora da zona de corte através de um jato de gás inerte de alta pressão. Este processo é também referido como corte a alta pressão ou a gás inerte. Os gases de corte tipicamente usados incluem nitrogénio e argon. A remoção do material é efetuada pelo aquecimento localmente do material acima do seu ponto de fusão. No entanto, em contraste com o corte por oxidação, o feixe de *laser* é a única fonte de calor e, como tal, a potência do *laser* necessária será maior. As arestas de corte resultantes não são oxidadas, o que é particularmente importante quando a soldadura é a próxima etapa do processo após o corte. O corte por fusão alcança velocidades de corte que são aproximadamente metade do que as conseguidas pelo corte por oxidação, devido à ausência da reação exotérmica do oxigénio. O requisito de pressão de gás no corte por fusão é muito maior, devido à diferença nas características de ejeção do metal fundido. Consequentemente, a espessura máxima da chapa metálica que ainda pode ser cortada por fusão é visivelmente mais fina, atingindo apenas 25 mm de espessura. O corte por fusão é normalmente usado para cortar aços de alta liga e alumínio [32].

Corte *laser* por vaporização

No corte *laser* por vaporização, o material é derretido pela energia absorvida do *laser* até que se evapora parcialmente, resultando na formação do corte. Para evitar a precipitação das emissões de gases quentes na peça e impedi-los de condensar dentro da secção cortada, é frequente a utilização de um jato de gás usado para expelir o material vaporizado, ver figura 4.1. Os gases tipicamente utilizados contêm nitrogénio, argon ou hélio, assegurando que as extremidades cortadas permaneçam livres de oxidação. A remoção de material auxiliada pela projeção do gás na largura de corte realizado, paralelo ao feixe, exige uma potência mais alta para a remoção de material devido à diminuição da temperatura na zona de corte. Como consequência, as velocidades de corte obtidas são muito mais lentas do que no corte por oxidação e no corte por fusão.

A profundidade de corte numa passagem (passagem única) é frequentemente na ordem de apenas vários micrómetros, o que leva a que materiais com um pouco maior espessura tenham que ser cortados por várias passagens (múltiplas passagem). Embora o corte por vaporização possa ser usado no processamento de metais, a velocidade de corte obtida é mais lenta do que noutros processos, tornando-a mais adequada para materiais com geometrias complexas ou materiais ultraduros não metálicos que exijam maior precisão e melhor qualidade de acabamento.

Nos materiais não-metálicos tipicamente processados por corte por vaporização incluem-se cerâmica, plástico, têxteis, madeira, papel, espumas e processamento de diamantes quer naturais quer sintéticos [32]. Este último processo é bastante importante para o caso de estudo que irá ser apresentado por ser o método de corte utilizado pela empresa (Palbit, S.A.) para o processamento dos insertos do diamante policristalino (*PCD*) na pastilha de metal duro.

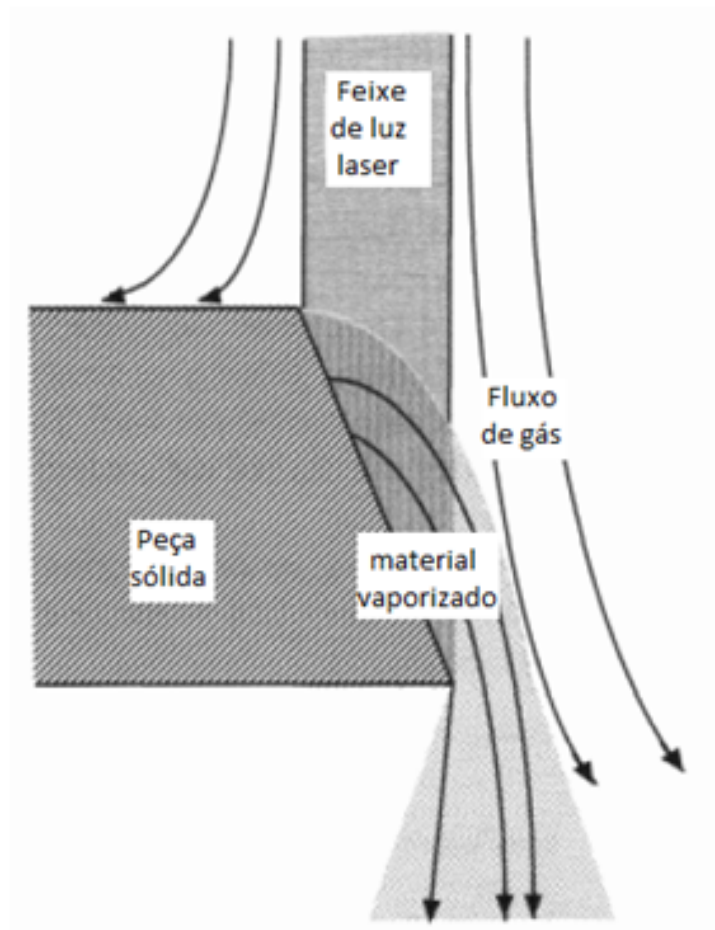


Figura 4.1: Princípio básico do corte *laser* por vaporização [32].

4.4 Vantagens e desvantagens do corte por *laser*

O corte por *laser* é a aplicação mais amplamente implementada desta tecnologia na indústria. Isto deve-se às grandes vantagens desta tecnologia em relação aos métodos tradicionais de corte e à sua versatilidade, que em muitos casos, se apresenta como uma alternativa economicamente melhor.

O processamento *laser* como um processo de maquinagem sem contacto parece ser um método promissor para o processamento de *PCD* devido à sua alta precisão de maquinagem, alta eficiência, ausência de desgaste de ferramenta e fácil ambiente de trabalho em relação aos demais processos de maquinagem nomeadamente a eletroerosão [11].

A zona térmicamente afetada (*HAZ- Heated Afected Zone*) pelo *laser* é extremamente reduzida devido à alta direcionalidade, focalização e à elevada potência do feixe de *laser* garantindo que não haja deformação ou distorção das peças trabalhadas. Além disso, esta tecnologia permite obter cortes mais rápidos e extremamente precisos, devido às larguras de corte mais reduzidas, resultando numa maior economia de tempo e material, já que geralmente a peça é realizada numa única operação, não havendo necessidade de retificar as arestas processadas ou de proceder ao transporte entre operações. Como o caminho do corte a *laser* é programado por computador, um grande grau de repetibilidade

é facilmente alcançado e, portanto, o desenho pode ser replicado exatamente igual ou ser modificado/alterado com relativa facilidade [38]. Outra das vantagens prende-se com a capacidade de cortar praticamente qualquer material bem como formas intrincadas e complexas, como por exemplo peças de materiais envolvendo contornos que compreendam um grande número de arcos com raio de curvatura variável, arestas com ângulos agudos, furos estreitos, pontes interligadas finas e entalhes angulares agudos sem ter que ocorrer troca de ferramenta, ou de materiais de desgaste [39]. Como não necessita de óleo de lubrificação, as peças saem mais limpas, não existe muita sujidade decorrente do processo de corte, poupando-se assim tempo e dinheiro decorrente do uso do lubrificante e da limpeza tanto das peças produzidas como da máquina utilizada [40]. A principal vantagem desta tecnologia prende-se com a capacidade de realizar geometrias 3D. como por exemplo o quebra-apara, como o exemplo da figura 4.2, de forma rápida, económica, viável e facilmente alterável ou repetida que de outra forma seria muito difícil e economicamente inviável.

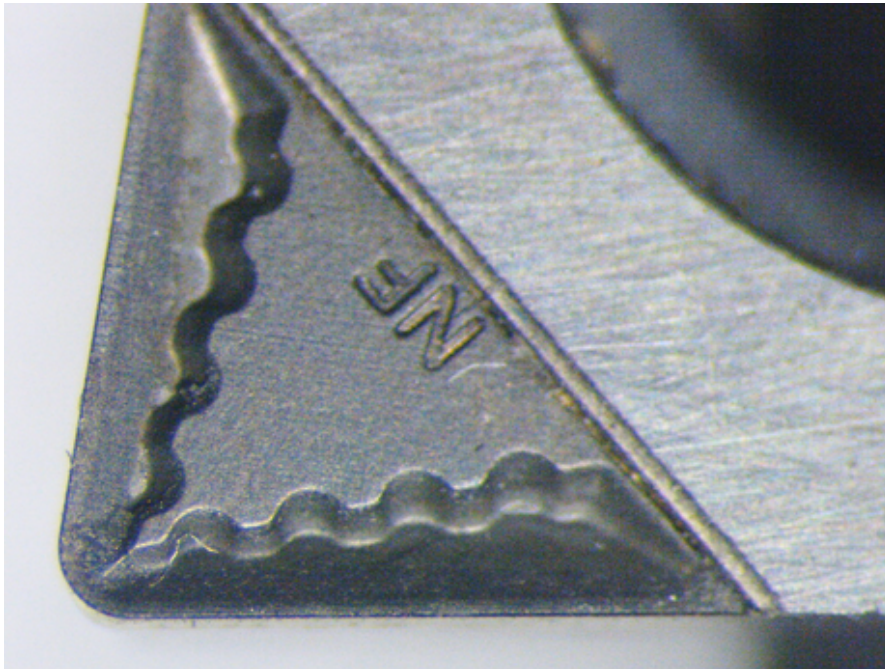


Figura 4.2: Exemplo de um quebra-aparas em *PCD* fabricado por *laser* [18].

O quebra-apara é uma parte integral e importante da geometria da ferramenta de corte. O *PCD* é geralmente utilizado para maquinagem de materiais de corte longo, como ligas de alumínio, onde é extremamente importante o fluxo de aparas e a qualidade da apara produzida. Antes de existir a possibilidade de inserir quebra-apara em *PCD* por maquinagem *laser*, estes eram realizados pelo processo de maquinagem por eletroerosão (*EDM*). O desenvolvimento e fabricação de elétrodos *EDM* tridimensionais é dispendioso e complicado e no caso do *PCD*, apenas desejável no caso de um quebra-apara obrigatório. No entanto, a vantagem de um quebra-apara não reside apenas na quebra de apara controlada. Através de um fluxo de aparas controlado também as forças de corte e a quantidade de calor no material da peça de trabalho podem ser reduzidas, prolongando o tempo de vida da ferramenta de corte. A inserção de um quebra-apara *3D* em ferramentas

PCD pode ser simplificada pelo uso da tecnologia *laser*. Desta forma, a pesquisa e o desenvolvimento de quebra- aparas em *PCD* tornam-se promissores e economicamente vantajosos [21]. O quebra-apara é geralmente projetado e otimizado de acordo com estudo de simulação. Os parâmetros identificados por *Jawahir* e *Fang*, descritos em [24] que influenciam o seu design incluem material a maquinar, raio de corte, profundidade de corte, velocidade de avanço, velocidade de corte e ângulo de inclinação. A Figura 4.3 apresenta um quebra-apara *3D* encontrado numa ferramenta de torneamento [24]. Exibe uma largura de ponta a ponta de $500\ \mu\text{m}$, uma profundidade de $28\ \mu\text{m}$ e um ângulo de ancoragem de 12° . Na Figura 4.4 observa-se um quebra-apara encontrado numa fresa

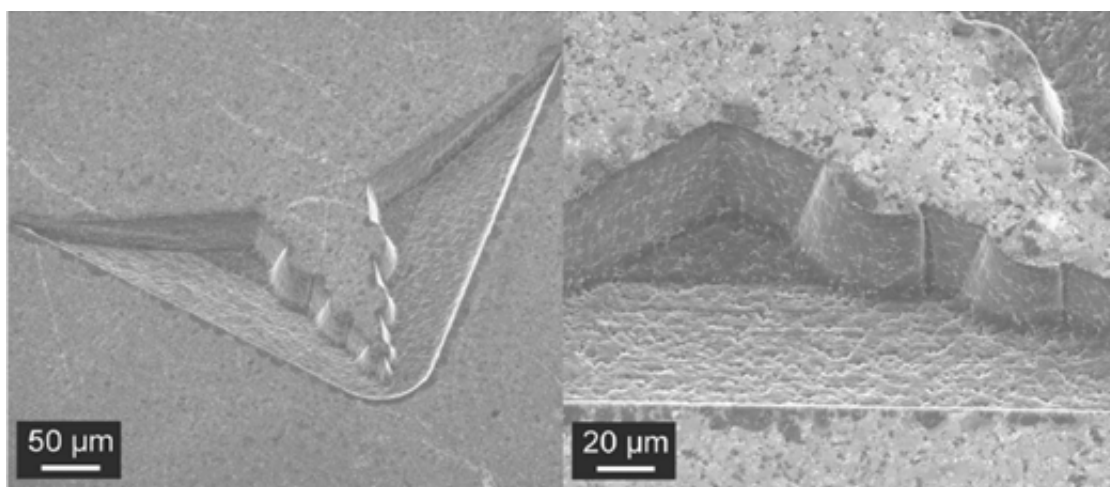


Figura 4.3: Quebra-apara encontrado numa ferramenta de torneamento [24].

de topo utilizada em operações de acabamento. Possui um comprimento de $1\ \text{mm}$, uma largura de $100\ \mu\text{m}$ e uma profundidade de $24\ \mu\text{m}$.

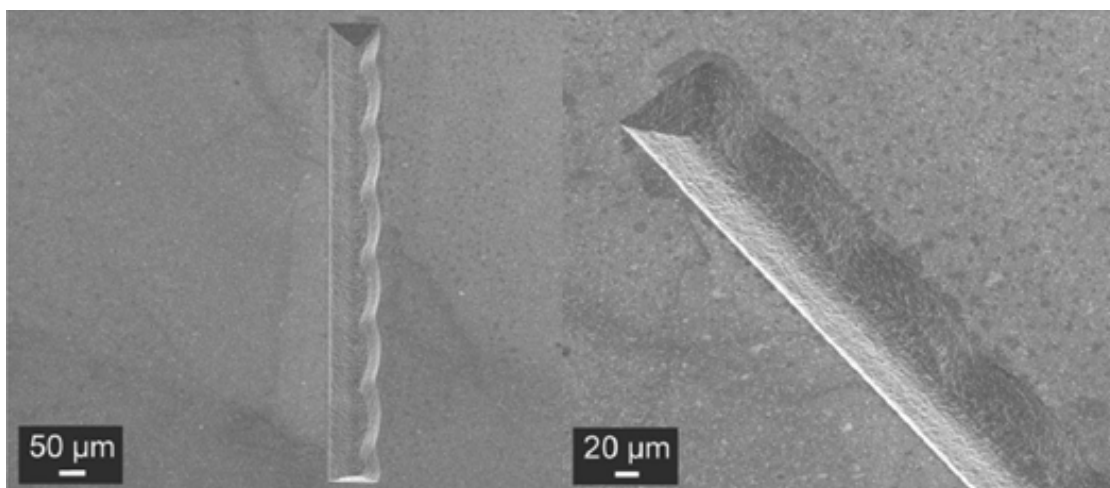


Figura 4.4: Quebra-apara encontrado numa ferramenta de fresagem [24].

Apesar de todas as suas vantagens, esta tecnologia de corte também apresenta algumas desvantagens ou limitações quando comparado com outras técnicas de corte. O corte

a *laser* tem sido tradicionalmente limitado ao corte de materiais finos com apenas alguns milímetros de espessura. Além disso, materiais como o alumínio e o cobre são difíceis de cortar utilizando tecnologia *laser* devido às suas características altamente reflexivas e condutoras, a maior parte da energia do *laser* pode ser refletida para longe da zona de corte. Outra desvantagem prende-se com a fusão e a têmpera rápida associadas ao processo, resultando numa aresta de corte dura em materiais endurecíveis. Do ponto de vista económico, o custo inicial de um sistema de corte a *laser* é relativamente mais alto quando comparado a outras tecnologias, como corte por plasma ou oxi-combustível, e envolve maior consumo de energia [28] e [40].

4.5 *Laser* nos PCD

Com o crescente desenvolvimento e utilização de materiais com alta dureza, alta resistência e de alta *performance* em diversas áreas de aplicação como é o caso das ferramentas de corte com *tip* de diamante, a maquinagem convencional já não consegue responder às exigências deste tipo de materiais devido ao excessivo custo dos materiais ultraduros e da ineficiência dos mesmos de conseguirem maquinar estes materiais de difícil maquinabilidade quer em velocidade quer em qualidade de aresta de corte. Com propriedades altamente atraentes, como dureza extremamente alta, alta tenacidade à fratura e alto grau de inércia química, o *PCD* e o *CVD* têm sido amplamente utilizados como material de ferramenta para maquinagem de materiais difíceis de maquinar, como vidros e materiais compósitos, como a fibra de carbono, bem como para brocas embebidas em óleo e de exploração de gás [41]. Para essas aplicações, são necessários recursos tridimensionais (3D) nas ferramentas de *PCD* com boa precisão dimensional e excelente qualidade da aresta de corte. Assim, é imperativo desenvolver um processo de micro maquinagem apropriado para a fabricação de ferramentas de *PCD*. Nesse sentido surgiu a utilização do *laser* aplicado ao corte do diamante policristalino brasado em pastilhas de metal duro como podemos ver na figura 4.5.

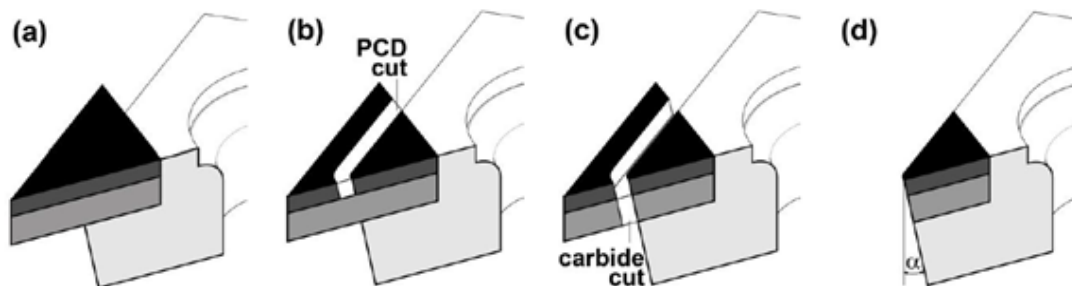


Figura 4.5: Processo de corte *laser*. (a) Pastilha em bruto (b) corte do PCD com ângulo de folga de 7° (c) corte do substrato de metal duro, com o mesmo ângulo (d) geometria final da pastilha de *PCD* com ângulo de folga [42].

A utilização do corte *laser* aplicado ao diamante policristalino é bastante recente e por esse motivo a informação disponível é algo escassa e sigilosa por ser uma área com enorme potencial de crescimento, desenvolvimento e altamente lucrativa. Vários investigadores como *Qi Wu*, *Jun Wang* [11] entre outros têm tentado explorar e aperfeiçoar o estudo de caracterização de processos de ablação procurando a otimização do processamento

Tabela 4.1: Propriedades físicas e químicas do PCD utilizadas na experiência [11].

Propriedades físicas	Valores	Composição química	Massa (%)
Densidade (g/cm ³)	3.8 - 4.1	Diamante	92
Média do tamanho de grão (μm)	25	Titânio	3
Condutividade térmica a 20C (W/m.K)	560	Liga de tungstênio e cobalto	3
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	1.5 - 3.8	Cobalto	2
Dureza knoop (kg/ mm ²)	5000 - 8000		
Temperatura de grafitação (K)	~1050		

de maquinagem *laser* aplicado ao PCD. *Harrison et al.* apresentam investigações sobre processamento *laser* de PCD utilizando durações de pulso desde 47 até 146 ns [43]. Por outro lado *Li et al.* utilizam durações de pulso de 300 femtosegundos sobre estruturas de diamante policristalino com grão de diamante de 25 μm para processamento *laser* ablativo [44]. *Qi Wu* após ter apresentado estudos sobre processamento de diamante utilizando *laser* ultravioleta com duração de pulso da ordem dos nanosegundos em 2010 [45], realizou outra abordagem em 2013 utilizando para o efeito *laser* de fibra de *ytterbium* sólido, que opera no comprimento de onda de 1080 μm com duração de pulso de 50 ns com taxa de repetição de 20 a 100 kHz, 1 mJ de energia de pulso e uma potência de 10 kW [11], que apresenta maiores semelhanças com as condições do presente projeto. O calor extenso induzido por uma fonte *laser* pode resultar em danos térmicos na superfície e na sub-superfície da peça de trabalho, por esse motivo, os vários autores contornam a situação com a utilização de pulsos ultra curtos da ordem de femto a nanosegundos para processamento preciso e sem danos. A duração de pulso de femtosegundos devido à sua fraca taxa de remoção de material torna-os inadequados para uso industrial, neste momento de desenvolvimento [21].

Tabela 4.2: Parâmetros *laser* utilizados na experiência [11].

Parâmetros do processo	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
<i>Pulse Overlap</i> , PO (%)	65	75	85	95
<i>Scan Overlap</i> , SO (%)	10	30	50	70
<i>Pulse Energy</i> , E (mJ)	0.2	0.4	0.6	0.8
<i>Number of passes</i> , NP	1	2	4	-

- **Pulse overlap** a sobreposição de impulsos (Sx) é definida como a sobreposição dos feixes de *laser* na superfície de trabalho entre dois impulsos consecutivos durante o movimento de deslocamento do *laser* segundo o eixo X (Sx).
- **Scan overlap** é definido pelo espaço sobreposto entre duas passagens transversais consecutivas segundo eixo Y (Sy)
- **Pulse Energy** Corresponde à energia de pulso do feixe luminoso.
- **Number of passes** Número de passagens

O estudo produzido por *Qi Wu* apresenta para cada teste de ablação, a realização de um desbaste num retângulo de 2 * 1 mm numa amostra de PCD com as características descritas na tabela 4.1. O estudo descrito na figura 4.6, centra-se na análise de 4 parâmetros

cada um com 4 graus de liberdade que podemos observar na tabela 4.2. Os autores referem a utilização de ultra-sons após a irradiação *laser*, para remoção da contaminação na superfície maquinada. As características obtidas em termos de morfologia e rugosidade da superfície foram examinadas usando um microscópio de varredura a *laser 3D (Keyence Model VK-X200)* com resolução de 0,5 nm. Foi observado que à medida que a energia do pulso do *laser* ou da sobreposição de impulsos aumentavam, a profundidade maquinada aumentava e as estrias ao longo da direção transversal tornavam-se mais evidentes. Como consequência, a superfície maquinada tornava-se mais áspera devido à não uniformidade da energia absorvida causada por variações na refletividade ótica de cada ponto da superfície e das diferentes fases presentes na superfície do *PCD*. Com um aumento adicional da energia interna e da sobreposição dos pulsos, a profundidade granulada aumentava, assim como ocorria a transformação de diamante em cristais de grafite e se observava a oxidação em grande escala na superfície maquinada devido ao excessivo acumular de calor no *PCD*. Com uma maior sobreposição de pulso ou energia de pulso, a remoção de material é mais facilmente obtida e os rasgos provocados pelo desgaste tornavam-se mais visíveis. O aquecimento por *laser* de uma zona do *PCD* resulta num aumento de

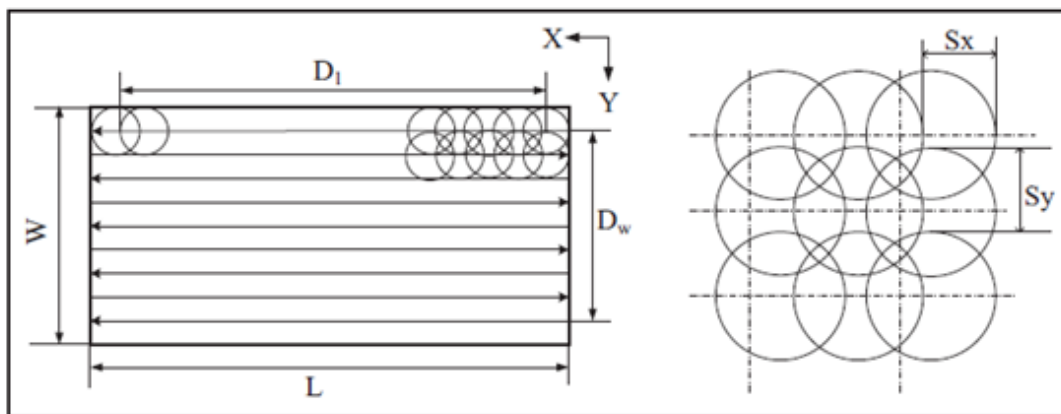
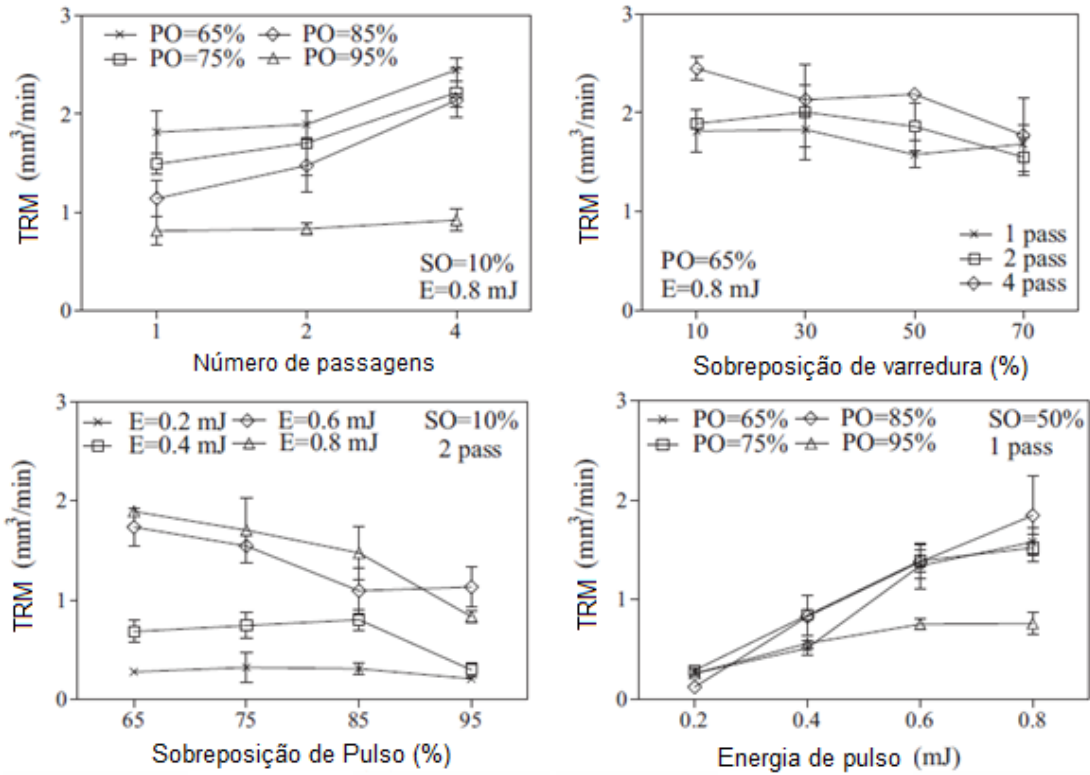


Figura 4.6: Descrição esquemática das condições de desgaste [11].

temperatura e de remoção de material. O aumento da temperatura estimula a transição da fase de carbono e a fusão de cobalto enquanto a remoção cria uma superfície rugosa. Quando uma sobreposição de pulso maior é utilizada, há um tempo de exposição mais longo para que a irradiação *laser* ocorra, resultando em maior remoção de material e um corte mais profundo. Verificou-se que foram obtidas superfícies relativamente mais suaves usando a sobreposição do pulso *laser* de 75%. Observações morfológicas mostram que um aumento na sobreposição de pulso causa um aumento significativo na oxidação da superfície. Especificamente, ocorreu uma enorme oxidação da superfície com sobreposição de pulso entre os 85 e os 95%, quando a energia de pulso é superior a 0,6 mJ. Com base na análise obtida na figura 4.7, os autores recomendam a seleção das variáveis do processo em 75% (ou 65%) de sobreposição de impulsos para se obter uma taxa de remoção de material alta, obtendo um nível de rugosidade da superfície aceitável e a espessura da camada danificada no seu ponto ótimo. Enquanto isso, a energia do pulso deve ser selecionada na região superior da faixa testada, ou seja, em torno de 0,8 mJ, para uma taxa de remoção de material alta sem comprometer significativamente a qualidade

da superfície e 50% de sobreposição de varredura sob uma operação de única passagem se o objetivo for grande profundidade de corte. Por outro lado, a ablação por múltiplas passagens pode ser considerada uma melhoria adicional na qualidade da superfície dependerá dos processos de acabamento subsequentes [11].



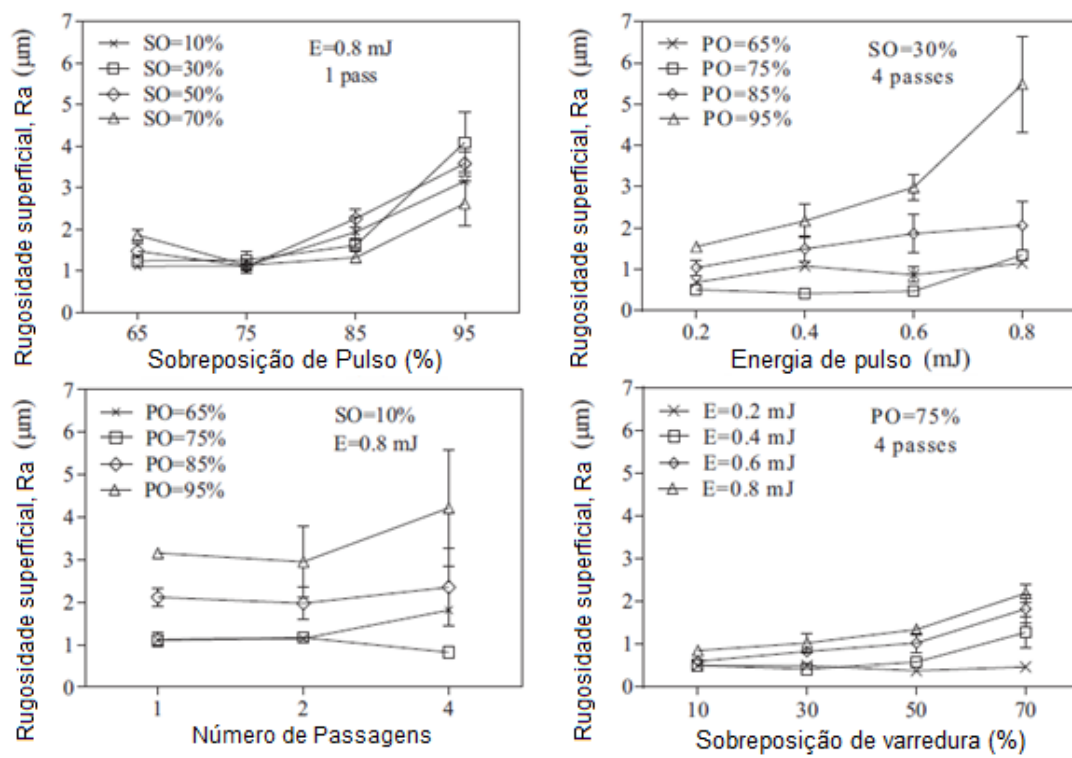


Figura 4.7: Comparação de parâmetros resultantes do estudo [11].

Capítulo 5

Método de *Taguchi*

Na década 40, começaram a surgir diversos conceitos estatísticos, que têm sido úteis à engenharia no que à melhoria da qualidade e do processo produtivo dizem respeito. Um dos principais responsáveis neste processo foi o Dr. *Genichi Taguchi*, em colaboração com o Dr. *Konishi*, ao criarem um conceito estatístico conhecido mundialmente como Método de *Taguchi* [46]. Inicialmente foi concebido para dar robustez e melhorar o processo de produção em contexto industrial, anos mais tarde foi adaptado para ser aplicado às mais diversas áreas da engenharia [47].

5.1 Considerações sobre o método de Taguchi

O método de *Taguchi* consiste num método de desenho de experiências fatoriais fracionado, ou seja, é apenas executada uma fração do número total de combinações das variáveis de entrada. Para que isso seja possível é necessário recorrer à utilização de matrizes compostas por vetores ortogonais para definir os testes a serem realizados. Um método de desenho de experiências é um teste ou uma série de testes em que são realizadas alterações deliberadas nas variáveis de entrada de um processo ou de um sistema de modo a que se possa observar e identificar os componentes que levam às alterações observadas nas variáveis de saída ou nas respostas [48]. O sucesso deste método reside no facto de alcançar os resultados desejados envolvendo uma seleção cuidadosa dos parâmetros do processo e a sua divisão entre fatores de controlo e de ruído. A seleção dos fatores de controlo deve ser tal que anule o efeito dos fatores de ruído. O Método de *Taguchi* envolve a identificação de fatores de controlo adequados para a obtenção dos melhores resultados do processo. São aplicados arranjos ortogonais para conduzir um conjunto de experimentos. Os resultados desses experimentos são utilizados para analisar as respostas obtidas de forma a prever a otimização dos parâmetros de entrada que obtêm um melhor resultado de acordo com as variáveis de saída pretendidas. Neste projeto, aplicou-se o método de *Taguchi* para otimizar cada um dos parâmetros de entrada de forma a obter-se a melhor rugosidade da face do *PCD* maquinada no menor tempo de maquinagem possível. A rugosidade da superfície é uma medida da suavidade de uma superfície e é um fator que tem uma alta influência no custo de fabricação. O acabamento da superfície é um dos elementos mais importantes para a qualidade da ferramenta de corte produzida, de forma a produzir cortes bem definidos na peça que será posteriormente maquinada com a ferramenta produzida. A qualidade superficial da pastilha de *PCD* também afeta

a sua vida útil e, como tal, é desejável obter a menor rugosidade possível a um menor custo possível. O menor custo corresponde a um menor tempo de utilização da máquina de corte *laser* bem como ao menor número de operações a realizar na ferramenta.

Aplicação do método de *Taguchi* no trabalho

O método de *Taguchi* iniciou-se com a determinação do objetivo do estudo que se queria produzir. O passo seguinte consistiu na determinação das variáveis a serem otimizadas, ou seja os parâmetros cuja variação produziam um efeito na qualidade final do produto, denominada variáveis de saída. Como exemplos deste tipo de variáveis podemos ter custo, corrosão, espessura, rugosidade, tempo, entre outras. Após escolha da resposta a utilizar decidiu-se que característica de estudo melhor se adequa à resposta seleccionada e ao estudo em questão. Existem três tipos de característica de estudo: quanto maior melhor (por exemplo tensão de rotura), quanto menor melhor (por exemplo rugosidade superficial, tempo) e nominal é o melhor (por exemplo as dimensões). O passo seguinte consistiu na identificação dos fatores de ruído que possam ter um impacto negativo no rendimento do sistema ou na qualidade dos resultados obtidos. Os fatores de ruído são os fatores impossíveis de controlar ou os que o seu controlo seja demasiado dispendioso. Segundo Sung H. Park existem três tipos de ruído [49]:

- Ruído Externo - Fatores ambientais, tais como: temperatura ambiente, Humidade. Condições de uso que possam prejudicar as funções do produto.
- Ruído Interno - Alterações que ocorrem quando um produto se deteriora durante o armazenamento, por fricção ou por desgaste das peças em uso.
- Ruído unidade a unidade - Diferenças entre produtos individuais devido a imperfeições no processo de fabrico, como por exemplo variações no *setup* da máquina.

O quarto passo traduziu-se na identificação dos parâmetros de controlo que têm efeitos significativos nas respostas escolhidas. Os parâmetros de controlo (teste) são aqueles cujos valores foram controlados e alterados. Os níveis para cada parâmetro de controlo foram escolhidos neste ponto. O número de níveis ou graus de liberdade de cada parâmetro de teste definiu o número mínimo de ensaios necessários a realizar. O passo seguinte foi a escolha da matriz de experiências e a definição do procedimento de análise de dados. A matriz escolhida teve que satisfazer o número de combinações mínimo para a análise dos parâmetros e respetivos níveis em estudo. Por exemplo para estudar quatro parâmetros a três níveis cada, seriam necessário uma matriz L9; como quisemos estudar sete parâmetros com três níveis em cada, seria necessário uma matriz L27. Este método disponibiliza um conjunto de matrizes com vetores ortogonais das quais poderíamos seleccionar a desejada, ou recorrer ao programa informático que criasse a matriz baseada nos princípios do método de *Taguchi*, com o número de fatores e níveis de acordo com os objetivos do presente documento.

O passo seguinte consistiu na realização dos ensaios experimentais determinados pela matriz de vetores ortogonais e o registo dos respetivos resultados. Depois de realizados os ensaios, determinou-se a regulação paramétrica ótima. Para a análise dos resultados, o método *Taguchi* utiliza uma medida estatística chamada quociente entre o sinal e o ruído (S/N). A obtenção dos valores do sinal e do ruído permite não só encontrar os parâmetros de controlo que permitam maximizar, minimizar ou centrar o resultado num

valor alvo, bem como escolher a regulação mais robusta, ou seja, a que perante variações de parâmetros não controláveis (parâmetros de ruído) apresente melhores resultados. Independentemente dos parâmetros de saída escolhidos a análise feita num estudo do quociente entre o sinal e o ruído é sempre realizada da mesma forma: "quanto maior for o sinal de ruído melhor". Na utilização do método de *Taguchi*, a condição ótima obtida pode não corresponder necessariamente a um dos ensaios já realizados durante a fase experimental, ou seja pode não corresponder a nenhuma das linhas da matriz de vetores ortogonais. Finalmente e após se ter encontrado os valores dos parâmetros ideais e de se prever a resposta para essa mesma regulação, deverá ser realizado um ensaio de confirmação. Após a realização de todos os passos, se os resultados forem satisfatórios, ou seja que se verifique uma melhoria no processo, termina a análise com o método de *Taguchi*. Caso os resultados não estejam dentro do esperado deve voltar-se ao início do processo com diferentes desenhos experimentais. Alternativamente a voltar ao início do método e realiza-lo todo de novo poderá realizar-se um novo desenho experimental com os valores obtidos pelo desenho anterior com o intervalo de valores dos níveis de cada parâmetro mais reduzido, fazendo-se assim um ajuste dos parâmetros.

Parte II

Procedimento experimental

Capítulo 6

Procedimento Experimental

Com o objetivo de avaliar as condições de processamento de micro maquinagem *laser* no processamento de arestas de corte e de quebra aparas em pastilhas de corte de diamante policristalino foram realizados dois tipos de ensaios: ensaios de corte simples na lateral do diamante para a produção de arestas de corte no *tip* de *PCD* e ensaios de ablação do *tip* de *PCD*, tendo como objetivo a formação de quebra- aparas no diamante. Toda a parte experimental decorreu nas instalações da Palbit.

6.1 Preparação experimental

O primeiro passo consistiu na escolha da geometria a utilizar na realização de ambos os ensaios. De entre as várias opções existentes no catálogo da empresa, selecionou-se a pastilha DCGW 11T304 por ser uma pastilha com um grau de alívio baixo de apenas 7 graus e com dimensões que permitem a análise, à *posteriori*, da rugosidade da face processada do *PCD*.

Os pós de carboneto de tungstênio e de cobalto passaram por vários processos de pulverometalurgia até à obtenção da mistura desejada. A mistura de pós foi prensada e sinterizada a elevada pressão e temperatura na matriz correspondente.

Procedeu-se à retificação periférica onde a pastilha adquiriu as dimensões finais, foi também nesta fase que se realizou o alojamento na pastilha para posteriormente se alorjar o *tip* de *PCD* como ilustra a figura 3.4. A figura 6.1 sumariza todos os processos que foram realizados para a obtenção da pastilha de metal duro.



Figura 6.1: Processo de produção das pastilhas de metal duro adaptado de [8].

O *PCD* utilizado nos ensaios é constituído por diamante policristalino com uma percentagem de 6% de Cobalto formando discos com diâmetro aproximado de 70 mm e espessura de 1,6 mm, constituídos por sub-microgrão de 6 μm , destinado a operações de

acabamento fino da superfície, como podemos observar na figura 6.2.

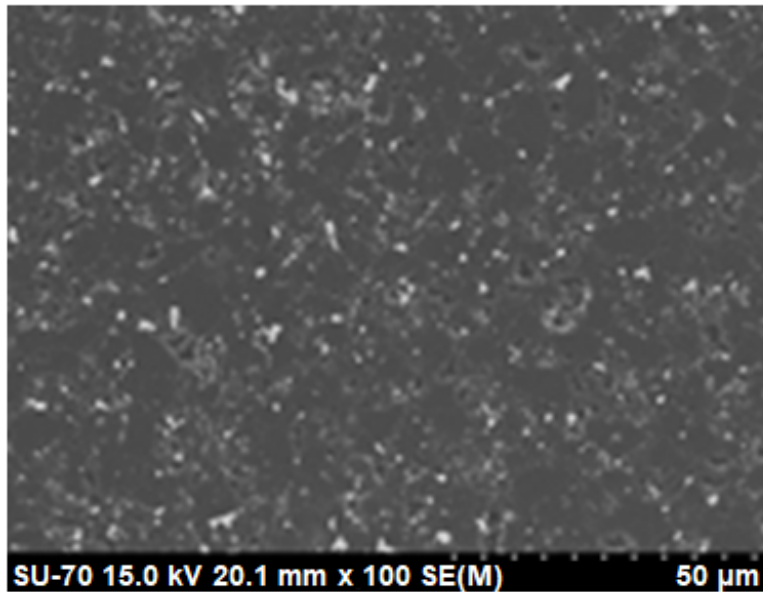


Figura 6.2: Imagem obtida por MEV do sub-microgrão de *PCD* utilizado no projeto, com grão fino de $6\mu\text{m}$ e 6% de cobalto. Ampliação de 100x [18].

O disco de *PCD* obtido do fabricante não se encontrava nas dimensões pretendidas tendo um perfil de espessura irregular como ilustra a figura 6.3, que não sendo do disco de *PCD* utilizado, serve como exemplo. A bolacha de *PCD* foi sujeita a retificação plana na zona do seu substrato de metal duro para ficar na dimensão pretendida de 1 mm contendo aproximadamente 50% de *PCD* e 50% de substrato de metal duro. O disco de *PCD* foi cortado em pequenos elementos denominados *tips* através de eletroerosão de fio.

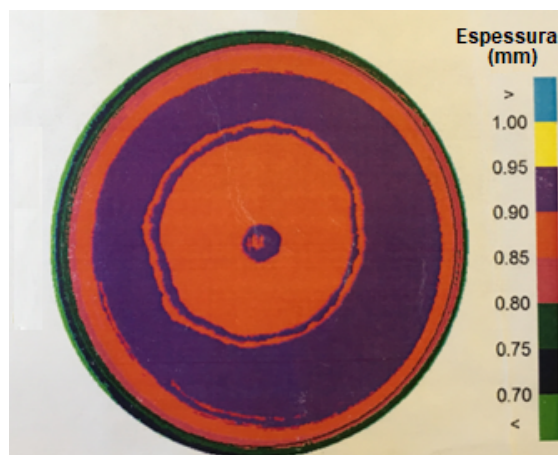


Figura 6.3: Perfil exemplificativo de espessura de Diamante e Cobalto, num disco de *PCD* com espessura superior ao usado [18].

Posteriormente as pastilhas e os *tips* de *PCD* foram submetidos a processos de lim-

peza ligeiramente distintos. As pastilhas de metal duro foram envolvidas num líquido próprio em combinação com ultra-sons por um período de 5 minutos de modo a retirar as impurezas que os processos anteriores pudessem ter adicionado. Os elementos de *PCD* de 1mm de espessura passaram por um processo diferente de limpeza que consistiu na fricção suave das superfícies expostas recorrendo a um pano micro-fibras embebido num produto de limpeza próprio para o *PCD* para retirar todas as impurezas. As pastilhas de metal duro e os elementos de diamante foram então mergulhados numa tina composta por álcool para uma limpeza final dos dois elementos bem como um processo de secagem mais rápido e eficiente. Após completa secagem das pastilhas de metal duro e dos *tips* de *PCD* iniciou-se o processo de *brasagem* onde se colocou a pasta de *brasagem* nas pastilhas de metal duro e se procedeu à colocação manual dos *tips* de *PCD* centrados na parte superior da pasta de *brasagem* com suficiente pressão para que os dois elementos ficassem aglutinados. A pasta de *brasagem* sofreu um processo de secagem num forno elétrico por um período de 20 min a uma temperatura de 200 °C. Após esse processo, removeu-se mecanicamente o excedente de pasta de *brasagem* que possa ter escorrido para o topo e lateral da face da pastilha de metal duro coeso ao elemento de *PCD*. Procedeu-se à *brasagem* propriamente dita, com recurso a um forno de vácuo de alta temperatura de lâmpadas de tungsténio. O processo de *brasagem* decorreu a 800 °C por um período de 40 minutos. Posteriormente seguiu-se o processamento de corte *laser*, já como uma pastilha de metal duro com *tip* de Diamante policristalino. A figura 6.4 apresenta as etapas principais do processo de produção das pastilhas de *PCD*.

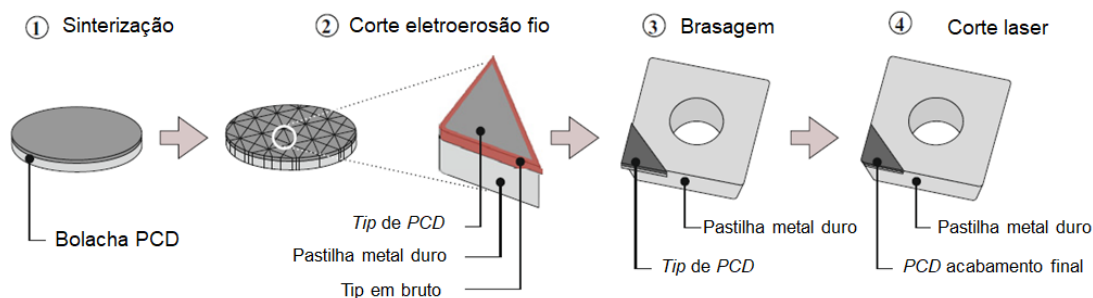


Figura 6.4: Processo de produção das pastilhas de *PCD*, adaptado de [50].

6.2 Processamento *laser*

Para o processamento *laser* utilizou-se uma máquina de corte *laser* por vaporização de material, com comprimento de onda de 532 nm emitindo radiação na região do Verde, como podemos ver na figura ilustrativa 6.5. O *laser* de estado sólido de *Nd:Yag - Neodymium-doped:Yttrium Aluminium Garnet* gera uma potência de pico de 13 kW, emitindo pulsos em intervalos de poucos nanosegundos. A máquina onde o *laser* está integrado, possui um controlo CNC de 5 eixos que permite cortar uma grande variedade de formas de pastilhas.

O software de controlo instalado na máquina utilizada já continha três programas pré-estabelecidos que serviram de base para a otimização dos parâmetros de corte da máquina *laser*. Estes programas destinavam-se a elementos de *PCD* com espessura de 1,6 mm sendo que a otimização que se pretendia obter se destinava a espessuras de *PCD*

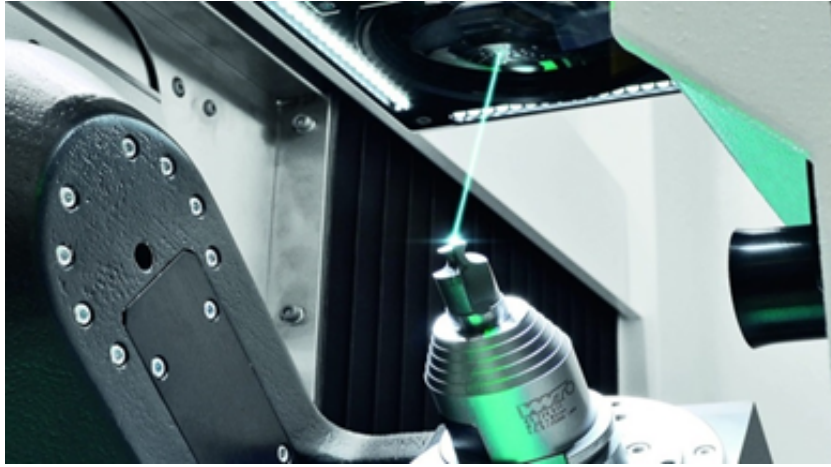


Figura 6.5: Imagem representativa da máquina de corte *laser* [51].

de 1 mm de espessura. Utilizou-se uma pastilha XDHW 060210, figura 6.6, com 1,6 mm de *PCD* para uma melhor compreensão e análise dos parâmetros pré-definidos bem como do funcionamento da máquina de corte *laser*.

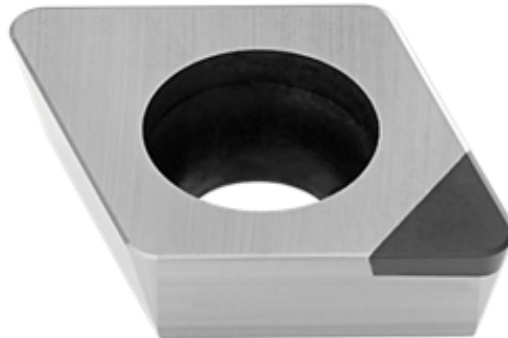


Figura 6.6: Representação da pastilha utilizada inicialmente XDHW 060210 [18].

Na tabela 6.1 são apresentados os principais parâmetros que variavam e que serviram de base à otimização dos parâmetros de corte *laser*.

- **Velocidade** Define a velocidade linear dos eixos CNC (mm/min);
- **Velocidade de pulso** Define a velocidade do pulso em (m/s);
- **Profundidade** Define a profundidade de remoção de material por passagem (mm);
- **Parâmetros** Define a sincronização do *laser* com os eixos de CNC;
- **Potência do *laser*** Define a potência máxima que o *laser* utiliza, em percentagem.

Para a análise da rugosidade recorreu-se ao perfilómetro ótico Sensofar S-Neox, por se tratar de uma pastilha com um *tip* de *PCD* demasiado curto que permitisse a análise

Tabela 6.1: Parâmetros iniciais que influenciam o processamento *laser*

Operação	Fatores	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Desbaste	Velocidade (mm/min)	60	80	80
	Velocidade de pulso (m/s)	0,8	0,3	0,3
	Profundidade (mm)	0,040	0,035	0,050
Acabamento	Parâmetros	0,29	0,055	0,1
	Velocidade (mm/min)	60	100	80
	Potência do <i>laser</i> (%)	97	97	97
	Profundidade (mm)	0,06	0,20	0,07
Controlo	Tempo de maquinagem (min:seg)	9:00	4:30	5:23
	Sa médio μm	0,1267	0,3933	0,1971

Nível 1: boa qualidade; Nível 2: baixa qualidade Nível 3: qualidade média

através de rugosímetros convencionais. Este sistema permite a análise da rugosidade a partir de uma leitura ótica da superfície desejada, mas não pode ser diretamente comparado com a rugosidade medida num rugosímetro convencional por se tratar de uma leitura de uma superfície tridimensional, enquanto o rugosímetro apenas mede num segmento de reta a 2 dimensões. Os resultados obtidos através do perfilómetro ótico assim como o respetivo tempo de maquinagem encontram-se apresentados na tabela 6.1. Após a análise da rugosidade da superfície através do perfilómetro ótico as pastilhas foram observadas através de microscópio ótico, como podemos ver na figura 6.7, 6.8 e 6.9.

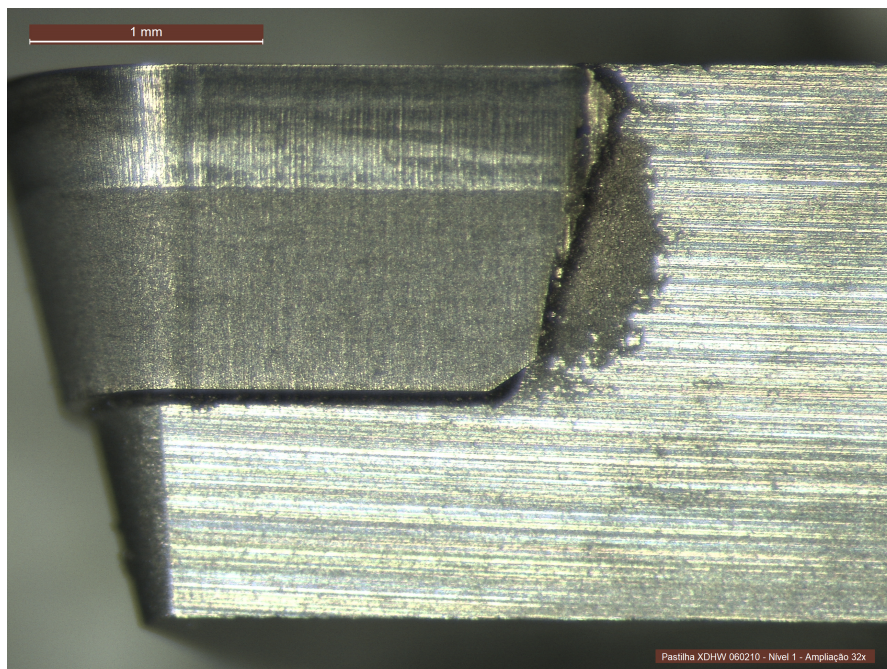


Figura 6.7: Imagem da pastilha após processamento *laser* do nível 1. Imagem obtida através de microscópio ótico com ampliação de 32x.

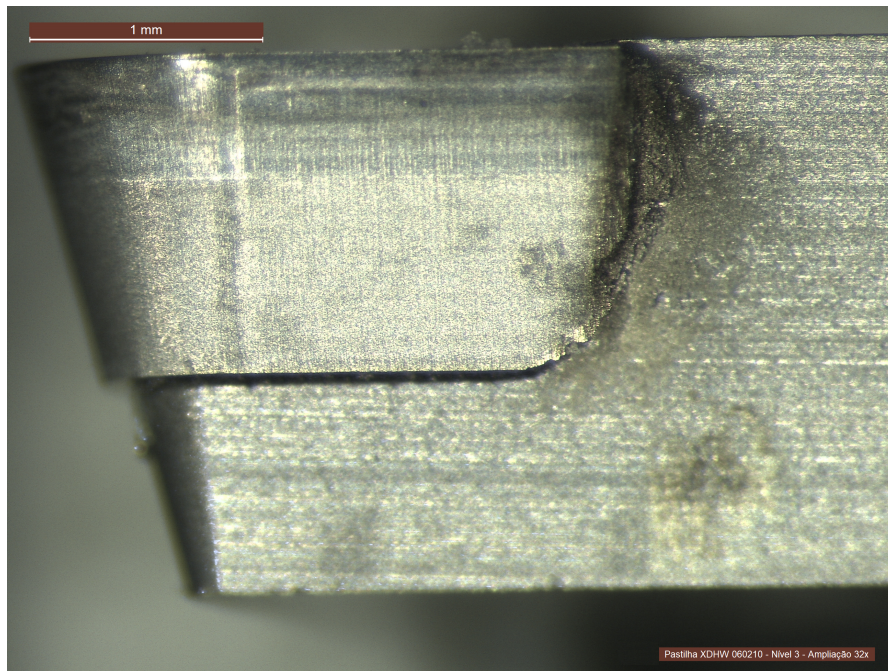


Figura 6.8: Imagem da pastilha após processamento *laser* do nível 3. Imagem obtida através de microscópio ótico com ampliação de 32x.

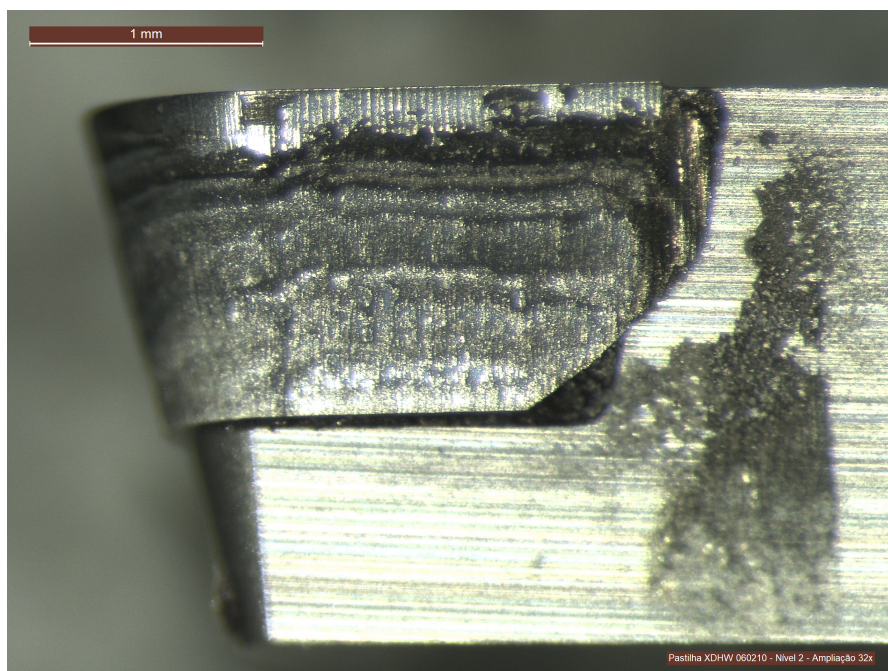


Figura 6.9: Imagem da pastilha após processamento *laser* do nível 2. Imagem obtida através de microscópio ótico com ampliação de 32x.

Posteriormente foram observadas por microscópio eletrônico de varrimento - MEV *Hitachi SU-70* para se comprovar a inexistência de vestígios de grafitação decorrentes

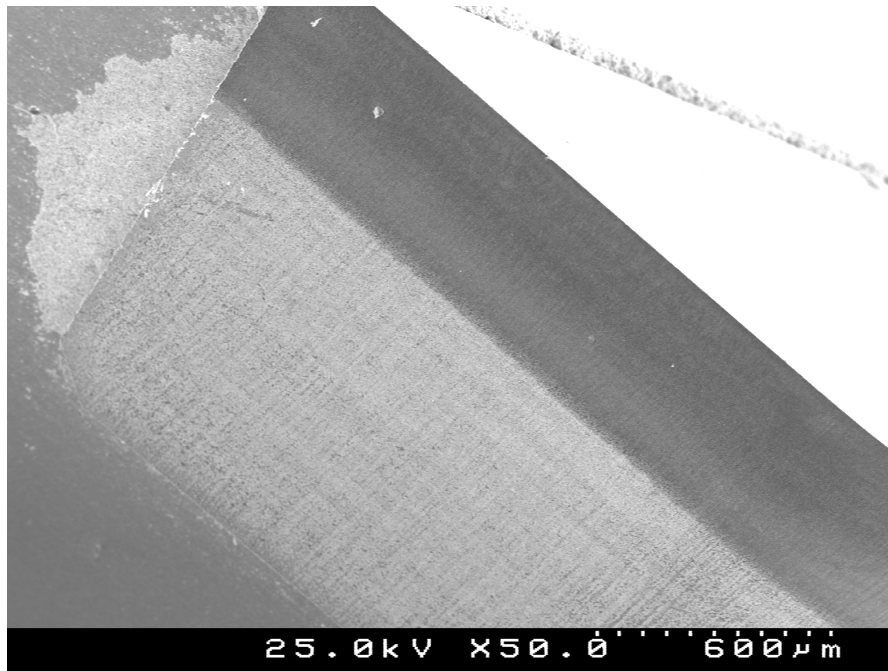


Figura 6.10: Imagens obtidas em MEV com ampliação de 50x da pastilha de nível 1.

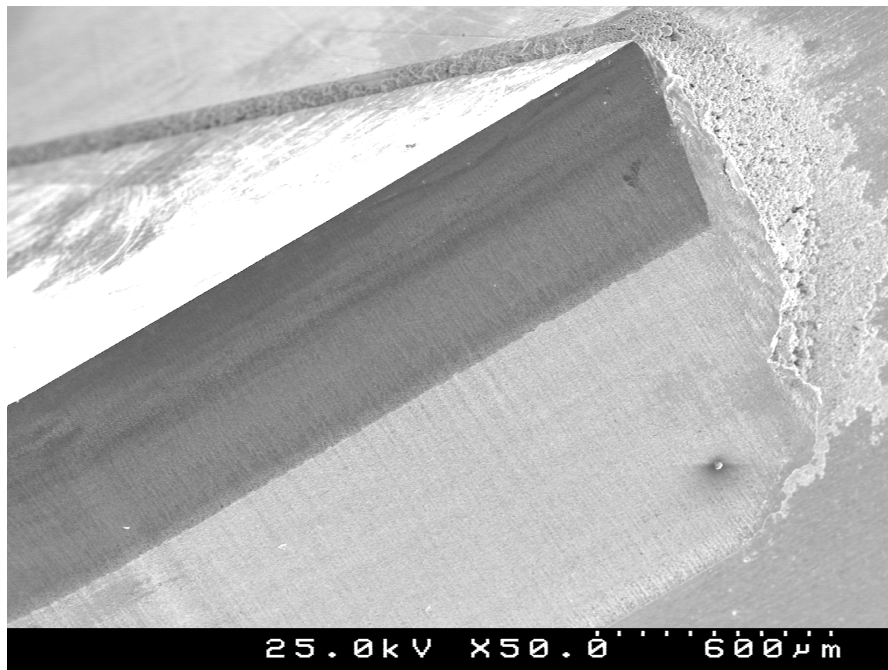


Figura 6.11: Imagens obtidas em MEV com ampliação de 50x da pastilha de nível 3.

do processamento *laser* a que foram sujeitos, como mostram as figuras 6.10, 6.11 e 6.12. Através da análise das imagens foram excluídas as dúvidas da existência de grafitação agregada na face da pastilha que pudessem comprometer a função de corte da pastilha. A mesma análise levantou questões sobre a qualidade da superfície de corte da pastilha

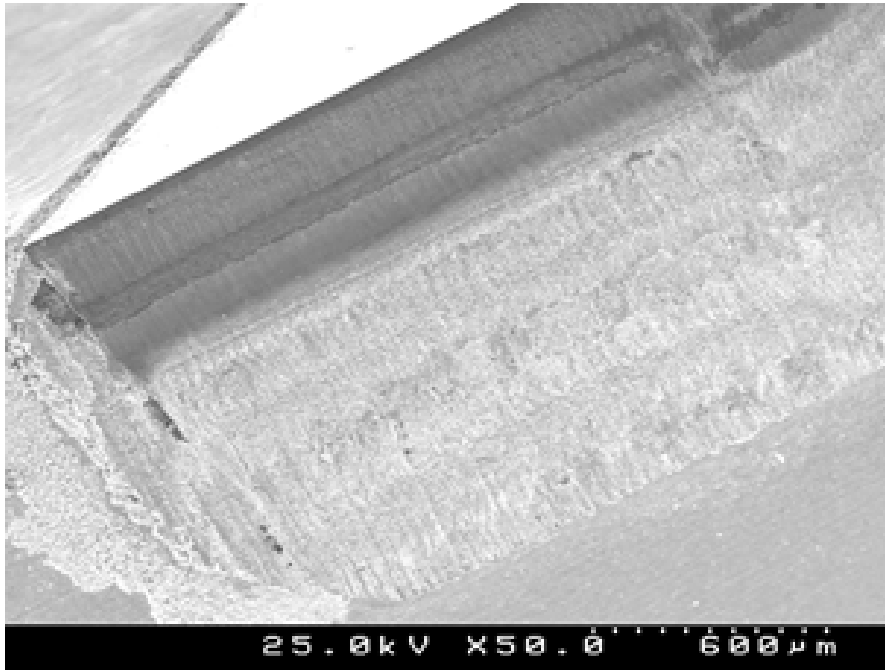


Figura 6.12: Imagens obtidas por MEV da pastilha nível 2, ampliada a 50x.

de nível 2.

Após a análise realizada aos três ensaios preliminares, tornou-se evidente que cada um dos sete parâmetros influenciavam tanto o tempo de corte como a qualidade da face obtida, independentemente, pelo que teríamos que estudar a influência de cada um dos fatores a 3 níveis de liberdade, procurando a melhor otimização. Para tal teriam que ser realizados 343 ensaios assim como as respetivas análises aos mesmos, sendo completamente inoportável quer a nível económico quer em tempo despendido.

Recorreu-se então à aplicação do método de *Taguchi*, descrito no capítulo anterior, que propõe para este caso de otimização constituído por 7 parâmetros cada um com 3 níveis de liberdade a realização de apenas 27 ensaios.

6.3 Caracterização do *PCD*

A caracterização do *PCD* processado contempla várias etapas, sendo algumas qualitativas e outras quantitativas. A matéria-prima utilizada no processo trata-se de diamante policristalino obtido por alta pressão e alta temperatura com uma percentagem de diamante de 93% e 7% de Cobalto com espessura de cerca de 0,5 mm sobre um substrato de metal duro com a mesma espessura, totalizando 1 mm de espessura.

Para uma análise rigorosa sobre as superfícies processadas utilizaram-se vários equipamentos que se encontravam disponíveis nas instalações da entidade acolhedora e no Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmicas da Universidade de Aveiro.

Tempo

Na análise do tempo de maquinagem destinado a cada um dos ensaios, optou-se por uma solução mais abrangente, fidedigna, exímia e que não fosse influenciável por fatores externos que pudessem comprometer o resultado final, para tal recorreu-se aos valores correspondentes ao tempo de maquinagem que a máquina *laser* regista para cada um dos ensaios. Não são contabilizados tempos de ajuste de máquina quer manuais quer automatizados por forma a não favorecer ou comprometer nenhum dos resultados, também não são contabilizados os tempos de troca de pastilha e respetivo aperto. Apenas é contabilizado o tempo em que efetivamente ocorre processamento *laser*.

Análise através de microscópio eletrónico de varrimento

Devido à possibilidade de ocorrer grafitização decorrente do processamento da aresta de corte surgiu a necessidade de se utilizar o microscópio eletrónico de varrimento (MEV), figura 6.13, analítico e de alta resolução, modelo *SU-70* da empresa *Hitachi* com uma capacidade de ampliação de 30 até 800.000 vezes em sistema de vácuo e com uma resolução de 1 nm, que permite captação de imagem da superfície processada de forma a garantir que a grafitização do diamante não ocorria nas amostras realizadas. Devido à complexidade de operação do MEV e à sua forte ocupação registada, procedeu-se a uma análise das três primeiras amostras que serviram de base à otimização de parâmetros.



Figura 6.13: Microscópio Electrónico de Varrimento, equipamento pertencente ao Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro [52].

Análise através de microscópio ótico

Para a obtenção e caracterização visual da face processada a *laser* utilizou-se o microscópio ótico *LEICA M80*, figura 6.14, auxiliado por uma câmara interligada ao computador que lhe dá suporte, de forma a observar-se melhor a qualidade da face bem como a obter imagem do microscópio em suporte digital.

O microscópio utilizado tem uma capacidade de ampliação de até 60x e dispõe de iluminação regulável para melhor iluminar as amostras de *PCD*. Devido à sua elevada ampliação e facilidade de operabilidade, aliado à sua boa resolução de 309 linhas/mm



Figura 6.14: Microscópio *Leica* M80 da Palbit [53].

obtida no monitor do computador tornou-se possível a obtenção de boas imagens da face de corte assim como a realização de uma análise da qualidade obtida após processamento *laser*.

Caracterização da rugosidade recorrendo a um rugosímetro

Para a análise da rugosidade da superfície foram equacionadas várias opções de rugosímetros e de métodos de análise pretendida. Recorreu-se ao rugosímetro da Palbit por respeitar a norma ISO 4287, por ser um aparelho com calibração certificada e ter apoio fixo o que ajuda a minimizar possíveis erros de medição decorrentes de vibrações ou de fatores externos.



Figura 6.15: Rugosímetro Tesa-Rugosurf 10G, Palbit.

Outro dos fatores que levaram à escolha deste equipamento prendeu-se com o facto de na sua base existir uma prensa que permite gerar e controlar os graus a dar à superfície

que queremos analisar. Utilizou-se o rugosímetro Tesa-Rugosurf-10G, figura 6.15, com uma resolução de $0,005 \mu\text{m}$ com *cut-off* de $0,25 \text{ mm}$ que corresponde a um percurso mínimo de medição de $0,75 \text{ mm}$ [54]. Com a ajuda da prensa com inclinação graduada conseguiu-se garantir uma medição plana visto as pastilhas terem uma inclinação na face de corte de -7° .

Caracterização obtida por perfilómetro ótico

O Perfilómetro ótico da *Sensofar Metrology*, figura 6.16, foi utilizado como forma de complementar a análise obtida pelo rugosímetro e de quantificar a irregularidade da superfície da face cortada na perpendicular à aresta de corte. Recorreu-se a este equipamento alocado ao Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro por ser um equipamento de medição sem contacto, medindo através de mapeamento *laser* 3D da superfície de *PCD* processada.



Figura 6.16: Perfilómetro ótico da *Sensofar Metrology*, versão 6.2 [55].

Contrariamente ao rugosímetro, este aparelho permite analisar um plano perpendicular à aresta de corte do *PCD* obtendo-se o S_a da superfície que nos dá uma ideia mais abrangente da superfície analisada e da qualidade da face maquinada. O perfilómetro ótico complementa o rugosímetro por se tratarem de planos de análise diferentes. O perfilómetro analisa a rugosidade de forma perpendicular à aresta de corte, enquanto que o rugosímetro devido às suas características apenas permite analisar paralelamente à aresta de corte do *PCD*. Não é possível comparar diretamente os valores obtidos de S_a com os valores obtidos de R_a , mesmo no mesmo plano de medição, apesar dos seus valores serem significativamente próximos um do outro, o meio de obtenção de dados é totalmente diferente.

Comparador

Os ensaios destinados ao fabrico de quebra-apara devido à sua geometria e forma complexa necessitaram de um método de análise diferente dos demais ensaios. Como forma de complementar a análise visual dos ensaios de ablação foram analisadas e comparadas as profundidades obtidas em cada um dos ensaios com recurso a um comparador de alturas *Mitutoyo*, figura 6.17, com uma resolução de $1 \mu\text{m}$ com medição no eixo ver-

tical, analisando por comparação, a profundidade obtida no processo de ablação desde a face de topo do *PCD* até à cota mais baixa do quebra-apara.



Figura 6.17: Comparador digital ID-F - Mitutoyo [56].

6.4 Parametrização e comparação dos resultados

Para a otimização dos parâmetros de corte por *laser* utilizou-se o método de *Taguchi* recorrendo ao programa *Mini Tab* 2018, versão experimental, executando-se a tabela L27 com sete fatores a três níveis de operação de acordo com o método de *Taguchi* tendo por base uma ligeira alteração aos parâmetros anteriormente descritos, dado que o nível 2 não se enquadrava nos parâmetros mínimos de qualidade exigidos pela empresa. Na tabela 6.2 encontram-se descritos os níveis utilizados na experiência.

Tabela 6.2: Parâmetros modificados que influenciam o processamento de corte *laser*

Operação	Fatores	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Desbaste	Velocidade (mm/min)	60	80	70
	Velocidade de pulso (m/s)	0,8	0,3	0,5
	Profundidade (mm)	0,040	0,035	0,050
Acabamento	Parâmetros	0,29	0,1	0,055
	Velocidade (mm/min)	60	80	70
	Potência do <i>laser</i> (%)	97	84	70
	Profundidade (mm)	0,06	0,04	0,07

Os parâmetros alterados na tabela 6.2 basearam-se numa primeira análise à qualidade superficial observada por comparação direta entre a qualidade obtida em cada um dos níveis, quer visual quer factualmente que nos levaram a alterar os valores correspondentes a cada nível. Outro dos motivos que ocasionou a alteração dos valores foi o facto de não cingirmos a parametrização apenas aos valores pré-programados, aliado ao facto de

Tabela 6.3: Matriz de ensaios de corte, segundo o método de *Taguchi*

Nº	Desbaste			Parâmetro	Acabamento		
	Vel. linear (mm/min)	Vel. pulso (m/s)	Profundidade de corte (mm)		Vel. linear (mm/min)	Potência <i>laser</i> (%)	Profundidade de corte (mm)
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1
5	1	2	2	2	2	2	2
6	1	2	2	2	3	3	3
7	1	3	3	3	1	1	1
8	1	3	3	3	2	2	2
9	1	3	3	3	3	3	3
10	2	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3
14	2	2	3	1	2	3	1
15	2	2	3	1	3	1	2
16	2	3	1	2	1	2	3
17	2	3	1	2	2	3	1
18	2	3	1	2	3	1	2
19	3	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2
23	3	2	1	3	2	1	3
24	3	2	1	3	3	2	1
25	3	3	2	1	1	3	2
26	3	3	2	1	2	1	3
27	3	3	2	1	3	2	1

o método de *Taguchi* pressupor uma interação de todos os fatores a diferentes níveis. Assim, dentro de cada parâmetro foi adicionado um valor intermédio, como podemos constatar por exemplo no primeiro parâmetro - velocidade - em que se introduziu o valor de 70 mm/min. Outro exemplo, na fase de acabamento reduziu-se a componente da velocidade de 100 para 80 mm/min por se acreditar ser um parâmetro com grande influência no degradingamento da qualidade da superfície não tendo com isso uma economia de tempo que justifique a degradação acentuada da qualidade superficial obtida. A tabela 6.3 corresponde à matriz de ensaios baseada no método de *Taguchi* com utilização de sete parâmetros de estudo a três graus de liberdade em cada um, num total de vinte e sete ensaios.

Inseriu-se no sistema de controlo da máquina de corte *laser* as vinte e sete combinações de forma a evitar erros relacionados com a má introdução dos parâmetros em cada ensaio, minimizando os fatores de ruído.

A empresa Palbit desenhou e fabricou o suporte para alocação da pastilha no braço da máquina *laser* para que todas as pastilhas estivessem nas mesmas condições iniciais. A máquina *laser* foi calibrada para as especificações referentes à pastilha DCGW 11T304. As pastilhas em bruto foram colocadas no interior da máquina *laser*, de forma manual,

no suporte específico de modo a obter-se o mínimo de fatores externos a interferirem nos ensaios. Após o processamento *laser* observou-se o tempo de maquinagem para cada pastilha individualmente. Retirou-se a pastilha do interior da máquina retirando-se as impurezas resultantes do processamento, com recurso a um material maleável próprio para o efeito. Repetiu-se o processo para as restantes vinte e seis pastilhas. De seguida utilizou-se o microscópio ótico para se verificar a qualidade da face cortada e procurar impurezas que pudessem comprometer os processos subsequentes. Procedeu-se a análise através de rugosímetro da empresa a todos os ensaios de forma a adquirir-se os valores de Ra correspondentes à rugosidade da superfície e o respetivo tempo de maquinagem para implementação no programa *Minitab*. A partir do software, obteve-se uma combinação de sete parâmetros que não estavam contemplados nos vinte e sete ensaios realizados anteriormente. Realizou-se o mesmo procedimento anteriormente descrito para esta nova pastilha com a introdução dos parâmetros otimizados segundo o método de *Taguchi*. Devido à complexidade do processo de análise através do perfilómetro ótico, apenas foram selecionados os quatro ensaios que melhor se enquadravam no objetivo do trabalho para uma análise da rugosidade de forma diferente com recurso a tecnologia *laser* através de perfilómetro ótico disponibilizado pelo Departamento de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro. Após obtenção dos dados de Ra e Sa referentes à rugosidade da face cortada e conseqüente tempo de maquinagem apurou-se qual o melhor conjunto de parâmetros que otimizavam a qualidade e o tempo de maquinagem para o processamento da face de corte.

Relativamente ao processo de execução do quebra-apara, o mesmo seguiu praticamente o mesmo procedimento que o processamento da face de corte, tendo sido utilizadas 7 novas pastilhas de metal duro com ponta de diamante policristalino, à exceção da introdução do quebra-aparas após o processamento do corte *laser*. A introdução do quebra-apara é feita por um processo de ablação que consiste no desbaste através do corte *laser* na parte superior da face do *PCD*, executando um quebra-aparas semelhante ao utilizado em pastilhas de metal duro. A escolha do número de ensaios a realizar não foi aleatória e foi deliberada recorrendo também ao método de *Taguchi*. À semelhança do processo anterior, o processo de ablação contava já com 3 programas pré-programados na máquina controladora. Foram selecionados os parâmetros que variavam entre os 3 níveis distintos de qualidade: nível 1, 2 e 3, que podemos observar na tabela 6.4.

Tabela 6.4: Execução do quebra-apara de 4 parâmetros a 3 graus de liberdade.

Operação		Nível 1	Nível 2	Nível 3
Desbaste	Potência <i>laser</i> (%)	64	90	75
	Profundidade de corte (mm)	0,0064	0,0160	0,0080
Acabamento	Potência <i>laser</i> (%)	64	100	75
	Profundidade de corte (mm)	0,0064	0,0160	0,0080

Atendendo ao facto de serem 4 parâmetros com 3 graus de liberdade cada, pela aplicação do método de *Taguchi* conclui-se ser necessário a execução de um total de 9 ensaios de ablação com o planeamento experimental descrito na tabela 6.5.

À semelhança do processo anterior as pastilhas foram colocadas e retiradas de forma manual e findo o processo, submetidas à ação de limpeza com recurso ao material maleável.

Tabela 6.5: Planeamento experimental do processo de ablação do quebra-apara na pastilha de *PCD*

N ^o	Desbaste		Acabamento	
	Potência <i>laser</i> (%)	Profundidade de corte (mm)	Potência <i>laser</i> (%)	Profundidade de corte (mm)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Parte III

Resultados, discussão e conclusão

Capítulo 7

Resultados Experimentais

O método de *Taguchi* foi criado com o objetivo de aprimorar a produção em ambiente industrial, de forma a obter os melhores resultados e as melhores otimizações de acordo com as variáveis de saída pretendidas, tendo sido aplicado ao longo dos tempos a diversas áreas, independente do produto ou uso que se pretenda aplicar.

O objetivo da utilização do método de *Taguchi*, no presente documento, consistiu na otimização dos parâmetros de utilização da máquina de corte *laser* de acordo com a diminuição da rugosidade obtida na zona de corte da pastilha assim como a diminuição do tempo de maquinagem destinado a cada pastilha, sendo estas as saídas pretendidas na aplicação do referido método. Os resultados obtidos dos ensaios de processamento *laser* da superfície de corte da pastilha de *PCD* e dos ensaios de processamento *laser* do quebra-apara serão apresentados, analisados e discutidos neste capítulo.

7.1 Ensaios de corte simples

De forma a ajudar à compreensão dos resultados obtidos, apresenta-se na tabela 7.1 a descrição dos parâmetros utilizados nos ensaios de acordo com o método de *Taguchi*.

Para conseguir ter uma real perspetiva da melhoria a alcançar utilizou-se como referência a pastilha 0, cujos parâmetros estão descritos na tabela 7.2, sendo uma otimização da entidade que forneceu a máquina de corte por *laser*, fornecidos à *posteriori* do planeamento dos ensaios, para uma pastilha de 1 mm de espessura da componente de *PCD*.

Após execução dos ensaios procedeu-se a uma rigorosa análise da rugosidade da superfície processada recorrendo-se ao rugosímetro, efetuando-se, para cada pastilha, 5 medições de modo a diminuir erros de medição ou falhas na leitura por parte do rugosímetro. O tempo de maquinagem correspondente a cada pastilha, foi obtido pela máquina de corte *laser*. Pode observar-se os resultados obtidos do tempo de maquinagem e da rugosidade na tabela 7.3, onde também se encontram apresentados os valores obtidos do quociente entre o sinal e o ruído do método de *Taguchi*, obtido através do software *Minitab*. Este método utiliza uma função que calcula o desvio entre o valor experimental e o valor desejado que é convertido num quociente entre o sinal e o ruído em que se procurou obter o menor valor possível - *lower the better* através da equação 7.1

$$n = \frac{S}{N_s} = -10 * \log \left[\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n * y^2 \right] \quad (7.1)$$

Tabela 7.1: Tabela com a compilação dos parâmetros de corte utilizados.

Nº	Desbaste			Parâmetro	Acabamento		
	Velocidade (mm/min)	Pulso (m/s)	Profundidade de corte (mm)		Velocidade (mm/min)	Potência <i>laser</i> (%)	Profundidade de corte (mm)
1	60	0,8	0,040	0,29	60	97	0,06
2	60	0,8	0,040	0,29	80	84	0,04
3	60	0,8	0,040	0,29	70	91	0,07
4	60	0,3	0,035	0,10	60	97	0,06
5	60	0,3	0,035	0,10	80	84	0,04
6	60	0,3	0,035	0,10	70	91	0,07
7	60	0,5	0,050	0,055	60	97	0,06
8	60	0,5	0,050	0,055	80	84	0,04
9	60	0,5	0,050	0,055	70	91	0,07
10	80	0,8	0,035	0,055	60	84	0,07
11	80	0,8	0,035	0,055	80	91	0,06
12	80	0,8	0,035	0,055	70	97	0,04
13	80	0,3	0,050	0,29	60	84	0,07
14	80	0,3	0,050	0,29	80	91	0,06
15	80	0,3	0,050	0,29	70	97	0,04
16	80	0,5	0,040	0,10	60	84	0,07
17	80	0,5	0,040	0,10	80	91	0,06
18	80	0,5	0,040	0,10	70	97	0,04
19	70	0,8	0,050	0,10	60	91	0,04
20	70	0,8	0,050	0,10	80	97	0,07
21	70	0,8	0,050	0,10	70	84	0,06
22	70	0,3	0,040	0,055	60	91	0,04
23	70	0,3	0,040	0,055	80	97	0,07
24	70	0,3	0,040	0,055	70	84	0,06
25	70	0,5	0,035	0,29	60	91	0,04
26	70	0,5	0,035	0,29	80	97	0,07
27	70	0,5	0,035	0,29	70	84	0,06

Tabela 7.2: Tabela com a compilação dos parâmetros de corte da pastilha 0.

Nº	Desbaste			Parâmetro	Acabamento		
	Velocidade (mm/min)	Pulso (m/s)	Profundidade de corte (mm)		Velocidade (mm/min)	Potência <i>laser</i> (%)	Profundidade de corte (mm)
0-ref.	80	0,5	0,05	0,29	80	97	0,05

Onde n representa o número de observações da experiência e o y representa os dados da experiência. Utilizou-se uma matriz L27 (3^7) de 27 ensaios, com 7 fatores a 3 níveis.

Pela análise dos dados obtidos constatou-se que na fase de acabamento o valor para a componente parâmetro de 0,055 provocava um valor de Ra mais elevado independente da velocidade, da potência e da profundidade utilizada. Ao que se conseguiu apurar durante a realização do trabalho e do contacto com a máquina, aliado à bibliografia apresentada em capítulos anteriores, tudo indica que este parâmetro esteja diretamente relacionado com a largura do feixe *laser* incidente na peça. A um menor feixe luminoso faz corresponder uma maior energia do *laser* por unidade de área, o que por sua vez, corresponde a um aumento significativo da temperatura nessa mesma região, o que explica a excessiva rugosidade da superfície de corte onde se observa uma camada reestruturada, ondulada e com estrias como se evidência na figura 7.1. Este fenómeno é explicado pela

Tabela 7.3: Tabela resultados da análise dos ensaios de corte.

N ^o	Ra (μm)	Tempo (min:seg)	Rácio Sinal / Ruído (db)
1	0,3140	07:43	-14,75
2	0,2334	08:00	-15,18
3	0,2970	06:56	-13,82
4	0,2182	08:19	-15,39
5	0,2170	08:43	-15,80
6	0,3540	07:32	-14,54
7	1,5706	06:41	-13,72
8	0,6016	07:05	-14,03
9	1,0552	05:54	-12,54
10	0,5828	06:33	-13,35
11	0,6718	06:14	-12,93
12	1,4336	07:51	-15,03
13	0,3226	05:19	-11,52
14	0,2280	05:00	-10,98
15	0,2896	06:37	-13,41
16	0,2322	06:06	-12,70
17	0,2634	05:47	-12,24
18	0,2176	07:24	-14,38
19	0,2862	07:39	-14,67
20	0,2216	05:05	-11,12
21	0,2470	05:43	-12,14
22	0,4192	08:33	-15,64
23	0,4628	05:59	-12,55
24	0,4270	06:37	-13,42
25	0,1342	09:04	-16,14
26	0,2198	06:30	-13,25
27	0,2814	07:08	-14,06
0	0.2572	05:21	Ref

ocorrência da fusão da camada de aglutinante de cobalto com carbono amorfo resultante da grafitização do diamante [21].

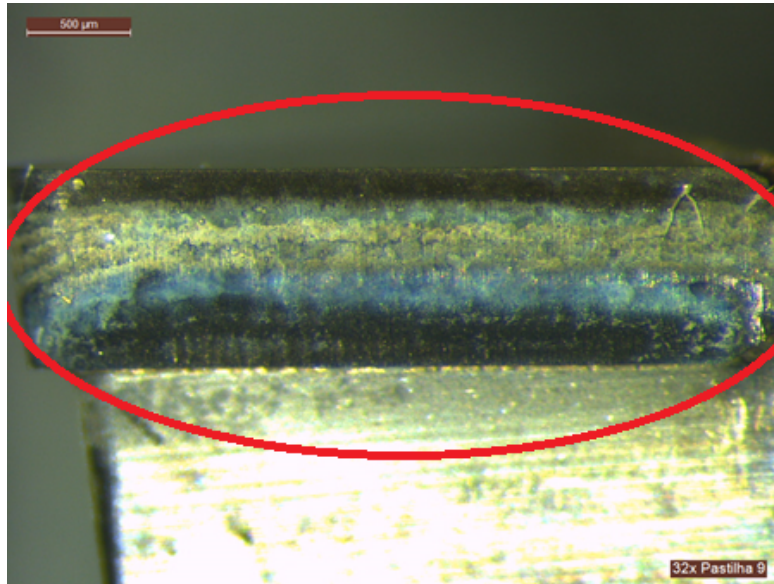


Figura 7.1: Observação microscópica ampliada a 32x da pastilha 9.

Observou-se uma situação semelhante nas pastilhas 7, 8, 9, 10, 11, 12, 22, 23, 24, conforme ilustrado nas figuras 7.2 e 7.3 em que o denominador comum a todas as pastilhas é o componente Parâmetro com o valor de 0,055. Pode concluir-se que o valor deste componente deverá situar-se entre 0,1 ou 0,29.

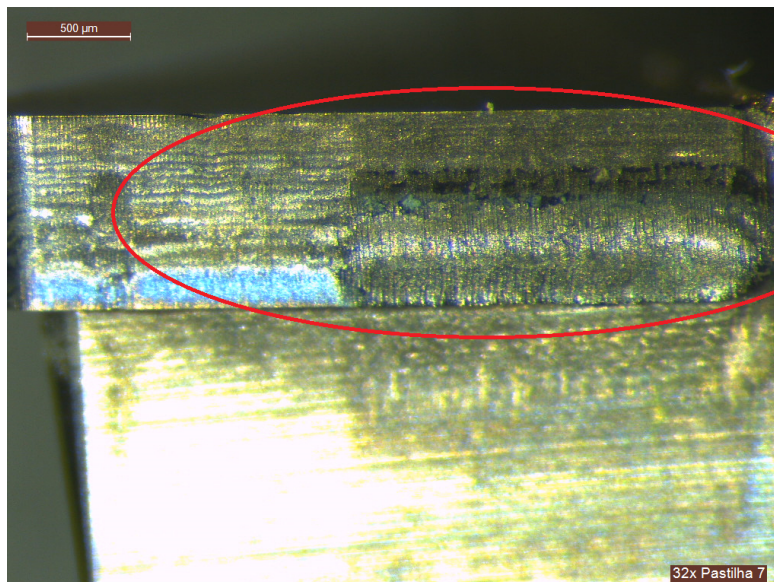


Figura 7.2: Defeito na pastilha 7 com ampliação de 32x.

De salientar que a pastilha 25 se destaca das restantes pelo seu baixo valor de Ra obtido, de $0,1342 \mu\text{m}$, por outro lado registou também o tempo de maquinagem mais

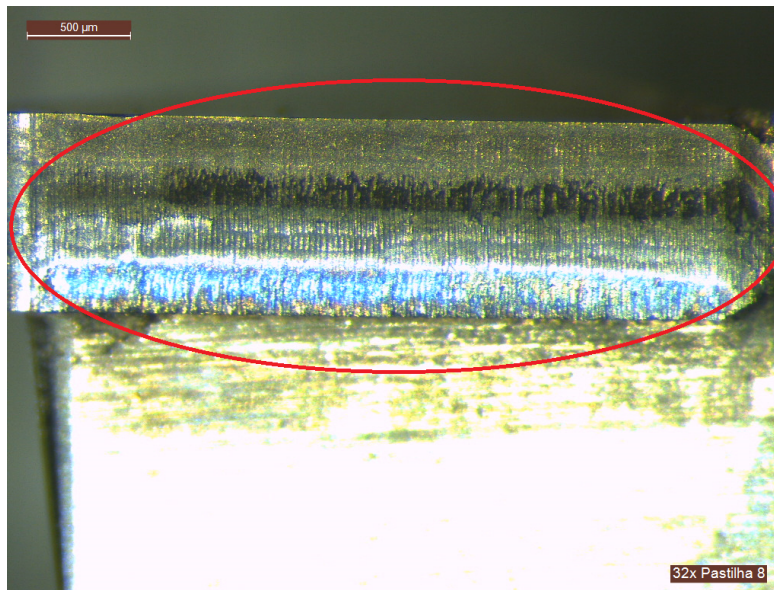


Figura 7.3: Outro exemplo de defeito na pastilha 8 com ampliação de 32x.

elevado, superior a 9 minutos. Os ensaios que obtiveram melhores resultados, tendo apenas em consideração a rugosidade, foram os ensaios 25, 5, 18 e 4 em que o valor de Ra médio situou-se abaixo dos $0,22 \mu\text{m}$ mas com tempos de maquinagem superiores a 7 minutos e 24 segundos longe do objetivo proposto. Estes valores de rugosidade Ra seriam os valores ótimos para os quais iríamos tentar aproximar fazendo diminuir o tempo de maquinagem sem comprometer a rugosidade da face. Segundo a análise feita por *Taguchi* e por uma questão de organização ordenaram-se os níveis correspondentes aos fatores por ordem crescente, correspondendo o nível 1 ao valor inferior e o nível 3 ao valor superior, como pode observar-se na tabela 7.4.

Tabela 7.4: Ordenação de fatores e níveis segundo *Taguchi*.

Factor	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Velocidade (mm/min)	60	70	80
Velocidade de pulso (m/s)	0,3	0,5	0,8
Profundidade de corte (mm)	0,035	0,04	0,05
Parâmetro	0,055	0,1	0,29
Velocidade acab. (mm/min)	60	70	80
Potência laser (%)	84	91	97
Profundidade de corte acab. (mm)	0,04	0,06	0,07

Como referido no capítulo 5, a análise de *Taguchi*, através do software *Minitab* produz o quociente entre o Sinal e o Ruído para cada um dos fatores. Na tabela 7.5 observa-se o quociente entre o Sinal e o Ruído tendo como variável de saída apenas o tempo de maquinagem.

Como referido no capítulo 5, independentemente da característica de estudo escolhida, neste caso 'quanto menor melhor', a análise ao quociente entre o Sinal e o Ruído deverá ser realizada procurando o valor que maximiza o valor do quociente em cada componente.

Tabela 7.5: Análise de *Taguchi* em função do tempo de maquinagem.

Nível	Desbaste			Acabamento			
	Velocidade (S/N)	Pulso (S/N)	Profundidade corte (S/N)	Parâmetro (S/N)	Velocidade (S/N)	Potência laser (S/N)	Profundidade corte (S/N)
1	-17,38	-16,65	-16,85	-16,68	-17,18	-16,57	-16,27
2	-16,67	-16,69	17,48	-16,67	-16,68	-16,71	-17,91
3	-15,93	-16,64	-15,64	-16,63	-16,12	-16,7	-15,8
Delta	1,45	0,06	1,84	0,06	1,07	0,13	2,1
% de contribuição	21,61%	0,89%	27,42%	0,89%	15,95%	1,94%	31,30%

O valor Delta resulta do cálculo do tamanho do efeito de cada componente tendo por base a diferença entre a média do valor mais alto da característica de resposta e o menor valor da característica de resposta para os vários níveis da cada fator [58]. A percentagem de contribuição é calculada pelo quociente entre o valor de Delta do fator e o valor total de Delta. A análise de *Taguchi* em função do tempo de maquinagem permite observar que a profundidade de corte da fase de acabamento é o componente que mais influência teve nos resultados obtidos, cerca de 2,1, enquanto que a profundidade de corte na fase de desbaste obteve 1,84, o segundo valor mais alto. A velocidade linear do eixo CNC durante a fase de desbaste apresenta maior influência do que o mesmo componente durante a operação de acabamento.

Pode concluir-se com a tabela 7.5 que os parâmetros que melhor otimizam a obtenção do tempo de maquinagem mais reduzido são: durante a fase de desbaste na componente de velocidade 80 (mm/min), uma velocidade de pulso de 0,8 (m/s) e uma profundidade de corte de 0,05 (mm). Durante a fase de acabamento obteve-se na componente parâmetro o valor de 0,29, com velocidade do eixo CNC de 80 (mm/min), potência *laser* de 84% e profundidade de corte de 0,07 (mm).

A tabela 7.6 apresenta-se o quociente entre o Sinal e o Ruído tendo como otimização a obtenção do valor mais baixo de Ra.

Tabela 7.6: Análise de *Taguchi* segundo a otimização do valor de Ra a obter.

Nível	Desbaste			Acabamento			
	Velocidade (S/N)	Pulso (S/N)	Profundidade corte (S/N)	Parâmetro (S/N)	Velocidade (S/N)	Potência laser (S/N)	Profundidade corte (S/N)
1	7,64	10,07	9,13	2,96	9,16	9,79	9,67
2	11,04	8,80	10,27	12,13	7,84	9,21	8,64
3	8,44	8,26	7,73	12,03	10,13	8,13	8,80
Delta	3,40	1,80	2,54	9,16	2,29	1,65	1,03
% de contribuição	15,53%	8,24%	11,60%	41,89%	10,47%	7,56%	4,71%

Pela tabela 7.6 conclui-se de forma óbvia que o componente mais importante na obtenção da mais baixa rugosidade é o componente Parâmetro com 41,89% de contribuição. De salientar que o valor do nível 1 do Parâmetro é muito inferior aos restantes níveis e corresponde ao valor de 0,055 o que corrobora a análise obtida anteriormente onde o valor de Parâmetro 0,055 faria aumentar em muito a rugosidade de tal forma que danificaria a face de corte da pastilha. Obtém-se com o valor de 0,055 o valor que representa o

transpor da barreira da ocorrência de grafitização e conseqüente aglutinação do carbono amorfo. A velocidade e a profundidade de corte durante a fase de desbaste representam uma contribuição conjunta de 27% o que ainda representa uma parcela importante no campo da rugosidade. Obteve-se durante a fase de desbaste, para a velocidade o valor de 70 (mm/min), uma velocidade de pulso de 0,3 (m/s) e uma profundidade de corte de 0,04 (mm). Durante a fase de acabamento obteve-se na componente parâmetro o valor de 0,1, com velocidade do eixo CNC de 80 (mm/min), potência *laser* de 84% e profundidade de corte de 0,04 (mm)

Por comparação com a análise relativa ao tempo de maquinagem pode constatar-se uma diminuição da velocidade linear, da velocidade de pulso e da profundidade de corte durante a fase de desbaste, optando-se apenas pelo valor mais baixo na velocidade de pulso. No que ao acabamento diz respeito, observa-se a escolha do valor médio na componente parâmetro de 0,1, uma mesma velocidade linear e potência *laser* finalizado pela escolha do menor valor para a profundidade de corte.

A tabela 7.7 exhibe o resultado do quociente entre o Sinal e o Ruído, para cada fator, otimizando o tempo de maquinagem e o valor de Ra de forma agregada.

Tabela 7.7: Tabela dos resultados do quociente entre o Sinal e o Ruído, para cada um dos fatores, com a combinação das variáveis de saída agregadas, tempo de maquinagem e Ra.

Nível	Desbaste			Acabamento			
	Velocidade S/N	Pulso S/N	Profundidade corte S/N	Parâmetro S/N	Velocidade S/N	Potência <i>laser</i> S/N	Profundidade corte S/N
1	-14,42	-13,69	-14,5	-13,69	-14,21	-13,58	-14,92
2	-13,67	-13,67	-13,85	-13,66	-13,7	-13,72	-13,29
3	-12,95	-13,67	-12,68	-13,68	-13,12	-13,73	-12,82
Delta	1,47	0,03	1,82	0,03	1,09	0,16	2,1
% de contribuição	21,94%	0,45%	27,16%	0,45%	16,27%	2,39%	31,34%

Era expectável que os componentes que mais influência teriam no tempo de maquinagem e na rugosidade da superfície seriam a profundidade de corte e a velocidade linear do eixo *CNC* selecionadas durante as fases de desbaste e de acabamento, o que os resultados vieram comprovar, como pode observar-se na tabela 7.7.

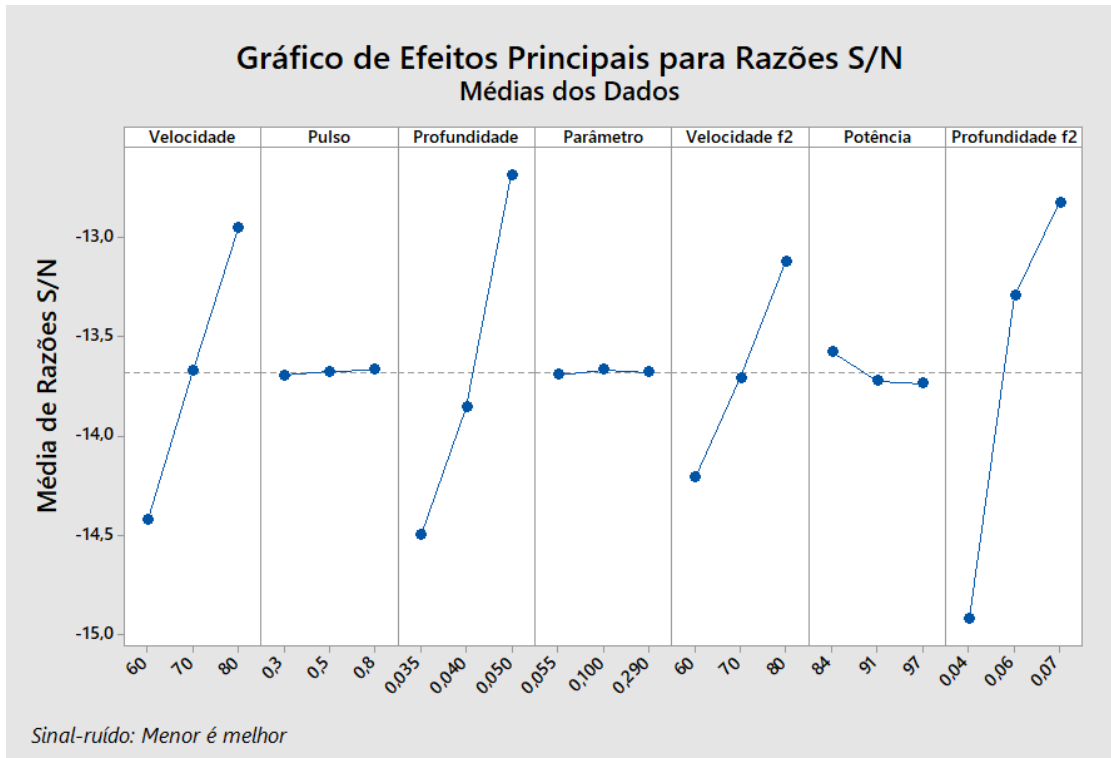
Obteve-se durante a fase de desbaste na componente de velocidade 80 (mm/min), uma velocidade de pulso de 0,8 (m/s) e uma profundidade de corte de 0,05 (mm). Durante a fase de acabamento obteve-se na componente parâmetro o valor de 0,1, com velocidade do eixo CNC de 80 (mm/min), potência *laser* de 84% e profundidade de corte de 0,07 (mm), estes valores encontram-se transcritos na tabela 7.8, assim como os resultados obtidos da análise da face cortada de *PCD* e o respetivo tempo de maquinagem obtido durante o processo experimental.

A figura 7.4 apresenta de forma gráfica o resultado da combinação das tabelas: 7.4, 7.7 e 7.8.

Analisando os resultados obtidos pelo método de *Taguchi* percebe-se um claro compromisso entre os vários parâmetros para se obter um menor tempo possível sem comprometer a qualidade da face processada. Na primeira fase ocorre o aumento de todos os parâmetros: velocidade do eixo CNC de 80 mm/min, velocidade de pulso de 0,8 m/s

Tabela 7.8: Tabela dos parâmetros obtidos com recurso ao método de *Taguchi*

Nº	Desbaste			Parâmetro	Acabamento				
	Velocidade (mm/min)	Pulso (m/s)	Profundidade corte (mm)		Velocidade (mm/min)	Potência <i>laser</i> (%)	Profundidade corte (mm)	Tempo de maquinagem	Ra (μm)
33	80	0,8	0,05	0,1	80	84	0,07	04:41	0,2342

Figura 7.4: Gráfico obtido no programa *Minitab* 2018 com o resultado da otimização utilizando o método de *Taguchi*.

e profundidade de corte de 0,05 mm. Isto pode ser explicado pelo facto de a primeira fase ser uma fase de desbaste, a qual é seguida de uma segunda fase de acabamento que pode corrigir eventuais defeitos que a primeira fase pudesse causar na face da pastilha.

Na fase de acabamento observa-se a utilização de um valor médio na componente parâmetro, onde o valor otimizado foi de 0,1 o qual faz corresponder uma largura do feixe *laser* de 0,085 mm. Consegue-se também perceber pelos resultados que a componente Parâmetro não tem influência sobre o tempo de maquinagem, por outro lado é o componente crucial para a rugosidade obtida. Durante a fase de acabamento, a componente de velocidade do eixo CNC, obteve como resposta o valor mais alto de 80 mm/min, um valor médio na potência de *laser* de 84% e voltando ao valor mais alto na profundidade de corte de 0,07 mm de forma a obter uma maior economia de tempo, utilizando quase a totalidade da fase de acabamento da pastilha n^o5 excetuando-se no fator profundidade de corte. Analisando os tempos parciais destas 2 pastilhas (n^o5 e n^o33), durante a fase de acabamento, o facto de se utilizar 0,07 mm em vez de 0,04 mm de profundidade de corte originou uma poupança de tempo de 1 min e 27 segundos tendo em conta que a pastilha n^o5 demorava 3 minutos e 20 segundos enquanto a pastilha n^o33 apenas de-

mora 1 minuto e 53 segundos. Durante a fase de desbaste observamos que a alteração da profundidade de corte de 0,035 para 0,05 mm mantendo os componentes velocidade do eixo CNC e velocidade de pulso constantes, leva a uma diminuição de tempo de 4 minutos e 2 segundos para 2 minutos e 48 segundos, verificando-se uma economia de 1 minuto e 14 segundos pela alteração da profundidade em 2 níveis. Por comparação com as análises do método de *Taguchi* anteriores consegue-se perceber que existe uma combinação de fatores entre a otimização do tempo de maquinagem e a otimização do valor da rugosidade, em que ocorre a quase totalidade dos componentes da otimização do tempo de maquinagem incorporando o fator mais importante, correspondente ao Parâmetro, da otimização produzida tendo em consideração apenas o valor de Ra. Em relação à pastilha 0 de referência, a diferença de tempo nas duas fases para a pastilha 33 é de 40 segundos o que apesar de parecer pouco significativo corresponde a uma economia de 12,46% do tempo despendido no fabrico da mesma pastilha, com a vantagem de se conseguir obter um valor de Ra ainda mais baixo, de apenas 0,2342 μm por comparação com 0,2572 μm da pastilha de referência, já de si uma otimização da empresa que forneceu a máquina de corte *laser*.

Observa-se na tabela 7.7 que a componente profundidade de corte durante a fase de acabamento é o componente que mais influência tem no tempo de maquinagem, cerca de 31,34% seguindo-se a profundidade de corte da fase de desbaste com 27,16%. A velocidade linear da fase de desbaste obteve 21,94% em relação à mesma componente na fase de acabamento que apenas obteve 16,27%. Os dois componentes que menor influência têm no tempo de maquinagem são a velocidade de pulso e o Parâmetro com a mesma percentagem de 0,45%. A percentagem de contribuição referente ao componente Parâmetro causa alguma controvérsia tendo como base as análises retiradas anteriormente e o facto de ser o fator que foi alterado aquando da otimização produzida pelas variáveis de saída agregadas. Este resultado pode estar relacionado, em parte, com a alteração de apenas um nível da componente Parâmetro, provocar um aumento significativo do valor de Ra provocado pelo fenómeno de grafitização.

Pode concluir-se que os fatores que fazem variar o tempo de maquinagem são as profundidades de corte e as velocidades dos eixos CNC em ambas as fases. Por outro lado, pode concluir-se que o parâmetro, a velocidade de pulso e a potência *laser* pouco afetam o tempo de maquinagem obtido.

As pastilhas que obtiveram os melhores resultados de acordo com o objetivo proposto, foram submetidas a uma limpeza através da imersão num banho de água destilada e ultrassons por um período de 15 minutos para poderem ser melhor analisadas através de perfilómetro ótico. Seguiu-se então a análise visual das 4 pastilhas, 0, 14, 20 e 33, no microscópio ótico onde podemos observar a pré limpeza nas figuras : 7.5, 7.6, 7.7, 7.8 e pós limpeza nas figuras: 7.9, 7.10, 7.11, 7.12, respetivamente.

O perfilómetro ótico mede a rugosidade através de um varrimento ótico com tecnologia de mapeamento da superfície em 3D sobre a área da superfície de *PCD*, pelo que a medição efetuada não corresponde ao Ra mas sim ao Sa e não pode ser diretamente comparada aos resultados anteriores obtidos com recurso ao rugosímetro visto a sua análise ter sido feita numa paralela à aresta de corte. Para a medição do perfilómetro ótico a área escolhida foi sempre a mais próxima possível, num plano perpendicular, à aresta de corte. Utilizou-se um perfilómetro *Sensofar* com uma objetiva de 100x e um percurso analisado de 50 μm tendo-se obtido os resultados apresentados na tabela 7.9.

Devido à necessidade de se efetuar a limpeza das pastilhas antes de serem submetidas

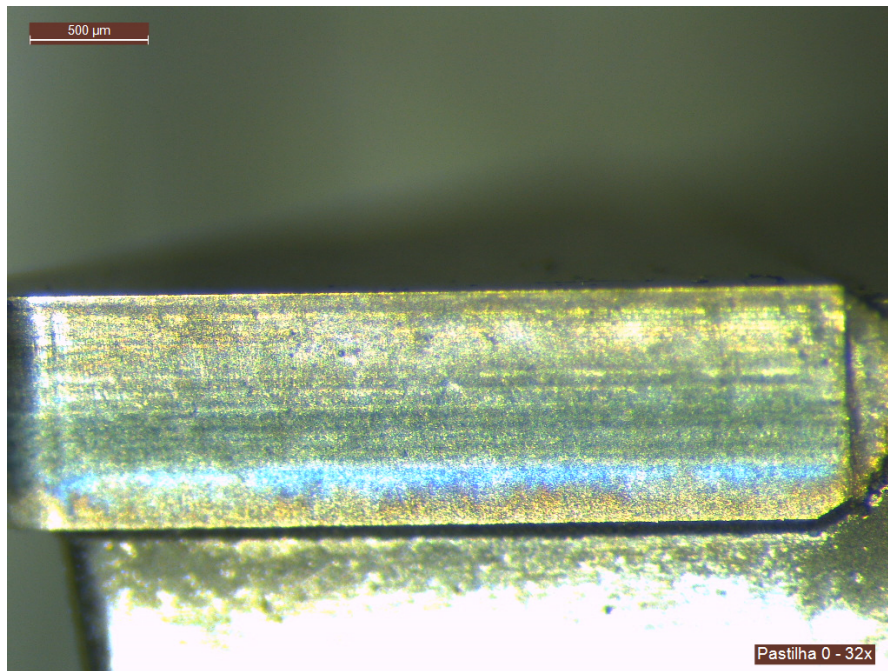


Figura 7.5: Pastilha 0 pré limpeza.

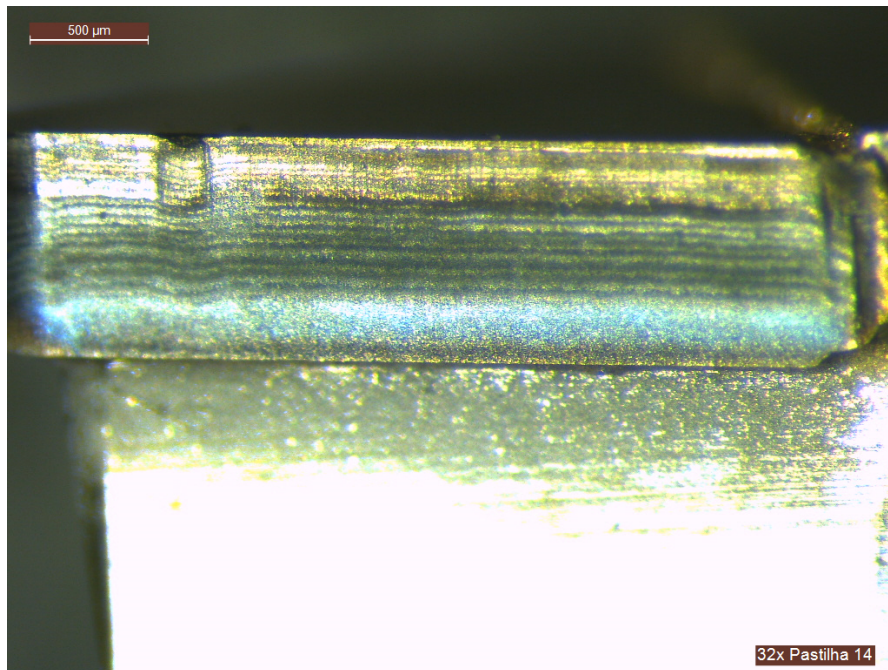


Figura 7.6: Pastilha 14 pré limpeza.

a análise do perfilômetro ótico e após análise dos resultados do perfilômetro, realizou-se novamente a análise da rugosidade no rugosímetro da empresa para observar, se a mesma tinha sofrido alteração provocada pela limpeza. Os resultados são apresentados na tabela 7.9. Após análise das rugosidades obtidas utilizando o rugosímetro conseguimos

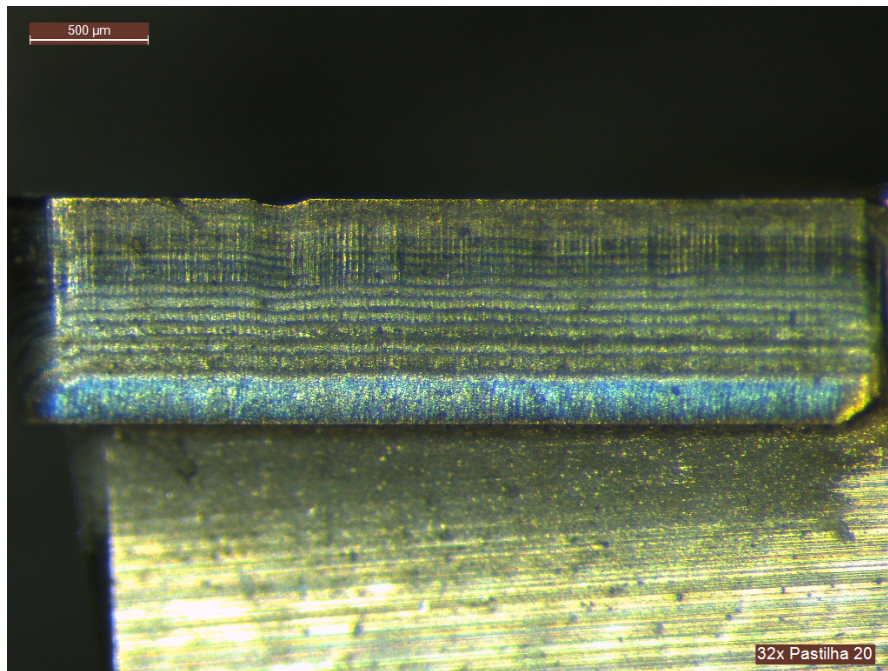


Figura 7.7: Pastilha 20 pré limpeza.

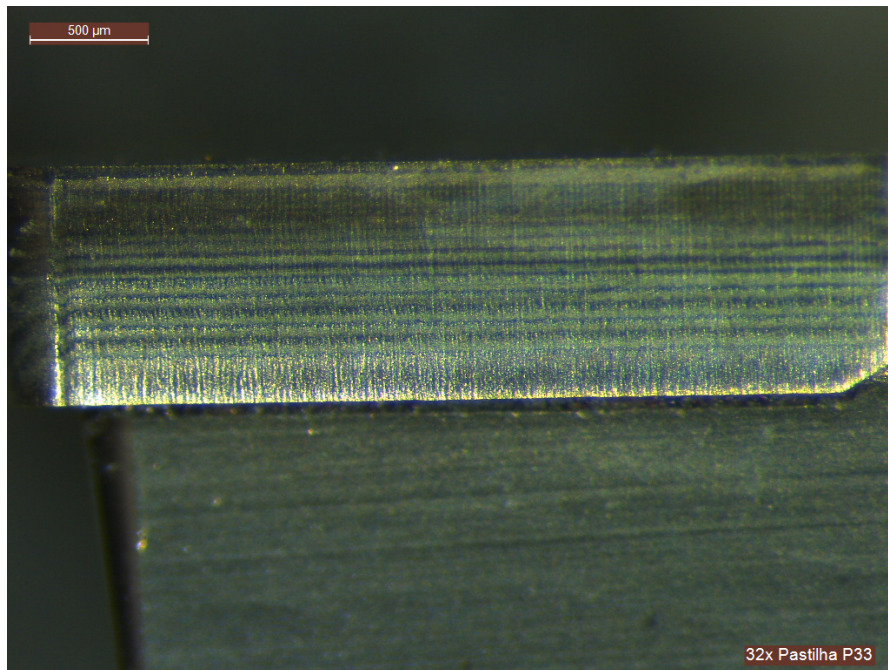


Figura 7.8: Pastilha 33 pré limpeza.

observar que a rugosidade da superfície R_a é alterada pela limpeza e que a variação entre o pré e o pós limpeza é praticamente idêntica em todas as pastilhas de aproximadamente $0.0754 \mu\text{m}$ mantendo-se as diferenças entre as pastilhas. A rugosidade medida pelo perfilômetro ótico veio comprovar que os resultados obtidos a partir do método de *Taguchi*

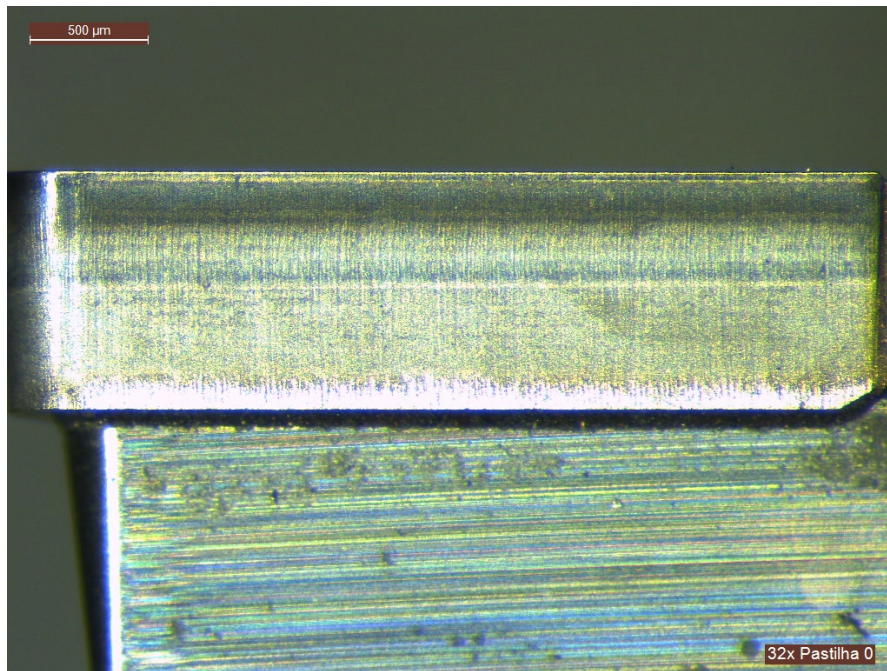


Figura 7.9: Pastilha 0 pós limpeza.

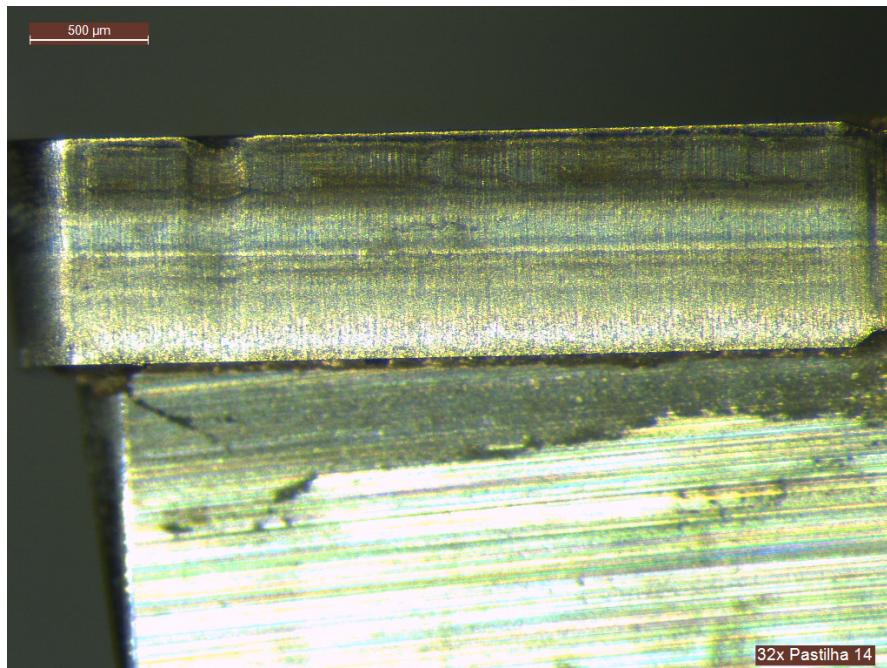


Figura 7.10: Pastilha 14 pós limpeza.

eram válidos e bastante satisfatórios a favor da pastilha nº33, tendo um acréscimo no valor de S_a de $0.088 \mu\text{m}$ em relação à pastilha de ref - 0, mas em contrapartida, um menor tempo de maquinagem de 40 segundos e um decréscimo no valor de R_a de $0,0148 \mu\text{m}$. Em resumo pode afirmar-se que existe uma diminuição de 12,46% do tempo de

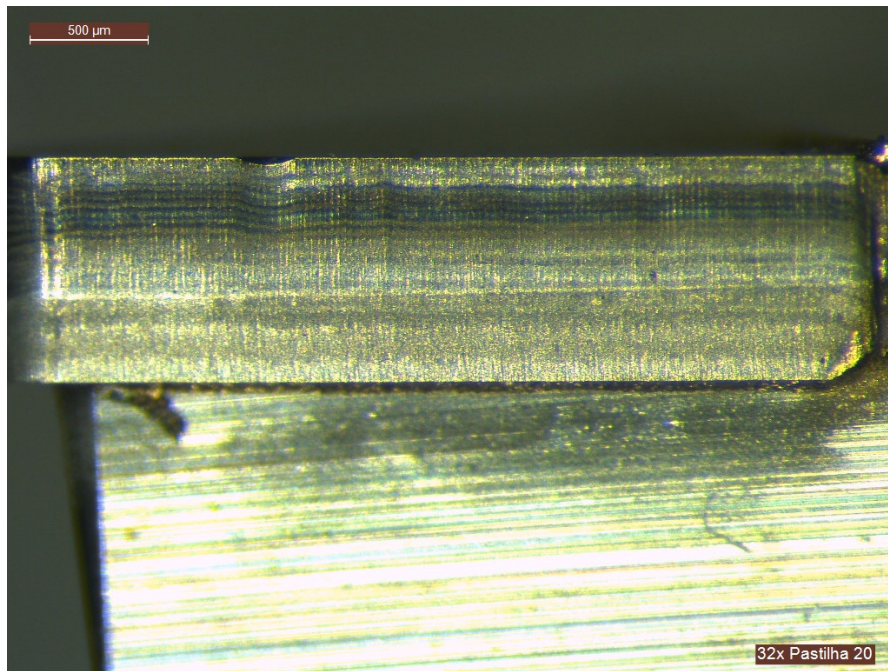


Figura 7.11: Pastilha 20 pós limpeza.

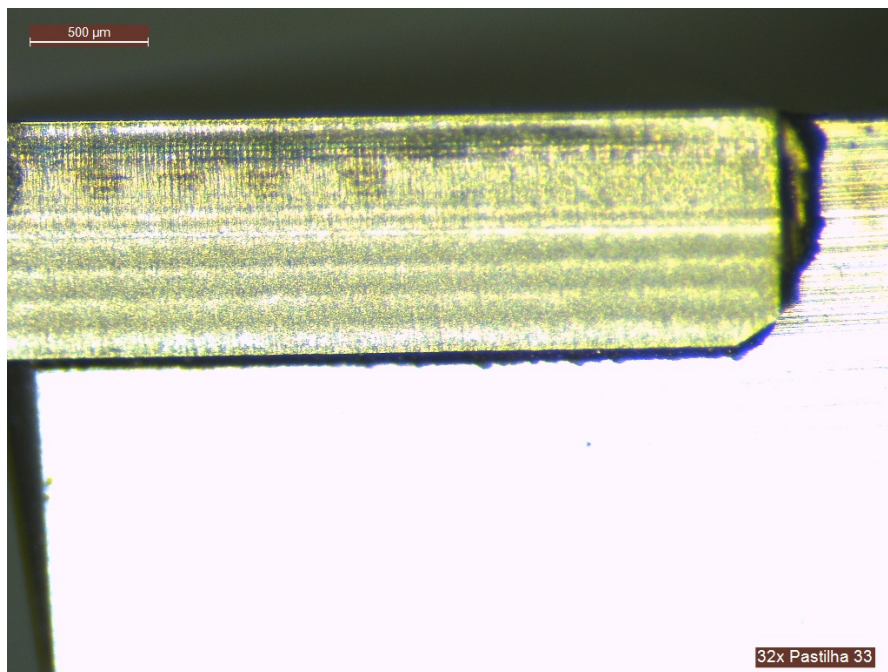


Figura 7.12: Pastilha 33 pós limpeza.

maquinagem gasto equivalente a 40 segundos por patilha, uma diminuição de 8,38% da rugosidade R_a obtendo-se um valor significativamente baixo de apenas $0,1618 \mu\text{m}$ tendo como contrapartida um aumento do valor de rugosidade S_a de 20% representando no entanto um valor de S_a de $0,1211 \mu\text{m}$, o que corresponde a um valor de rugosidade

Tabela 7.9: Compilação das pastilhas sujeitas a análise no perfilómetro ótico

N ^o	Desbaste			Parâmetro	Acabamento			Resultados		
	Velocidade (mm/min)	Pulso (m/s)	Profundidade de corte (mm)		Velocidade (mm/min)	Potência laser (%)	Profundidade de corte (mm)	Tempo de maquinagem	Ra (μm)	Sa (μm)
0	80	0,5	0,05	0,29	80	97	0,05	05:21	0,1766	0,1003
14	80	0,3	0,05	0,29	80	91	0,06	05:00	0,1554	0,1547
20	70	0,8	0,05	0,10	80	97	0,07	05:05	0,1456	0,1698
33	80	0,8	0,05	0,10	80	84	0,07	04:41	0,1618	0,1211

consideravelmente baixo.

7.2 Ensaios de ablação

Aplicou-se também o método de *Taguchi* ao processo de ablação que deu origem ao quebra-apara. Identificaram-se os 4 fatores que sofrem alteração durante o processo de seleção do nível pretendido, utilizaram-se 3 graus de liberdade para cada componente, na tabela 7.10 pode observar-se os componentes de cada ensaio, segundo o método de *Taguchi*, assim como os resultados referentes à profundidade média alcançada, à qualidade visual do quebra-apara produzido e ao respetivo tempo de maquinagem obtido.

Tabela 7.10: Parametrização e resultados do quebra-apara.

N ^o	Desbaste		Acabamento		Resultado		
	Potência do laser (%)	Profundidade de corte (mm)	Potência do laser (%)	Profundidade de corte (mm)	Profundidade (mm)	Qualidade visual	Tempo de Maquinagem (s)
1	64	0,0064	64	0,0064	0,1683	Boa	69
2	64	0,016	100	0,016	0,0651	Fraca	27
3	64	0,008	75	0,008	0,1423	Razoável	55
4	90	0,0064	100	0,008	0,3091	Razoável	69
5	90	0,016	75	0,0064	0,201	Perfeita	27
6	90	0,008	64	0,016	0,2763	Boa	55
7	75	0,0064	75	0,016	0,2165	Perfeita	69
8	75	0,016	64	0,008	0,2364	Fraca	27
9	75	0,008	100	0,0064	0,198	Razoável	55

À semelhança do processamento do corte *laser* também, neste processo, utilizou-se o tempo de maquinagem obtido diretamente da máquina *laser*, sem se contabilizar o tempo destinado a ajustes e ao processo de corte *laser* a que a pastilha foi submetida. A profundidade do quebra-apara obtida corresponde a uma média de 6 medições produzidas recorrendo ao comparador referido no capítulo 6, com uma ponta de prova reduzida de modo a comparar a face inferior do quebra-apara, com a face superior do *PCD*. A observação da qualidade visual do quebra-apara realizou-se no microscópio Leica da Palbit, S.A., que permite a obtenção de imagem em suporte digital.

Observa-se na figura 7.13 e 7.14 que as pastilhas número 2 e 8, sofreram alteração da estrutura da aresta de corte, visível através de observação microscópica, ampliada a 32x no microscópio ótico. Esta alteração da aresta de corte inviabiliza a sua função como pastilha de corte. À semelhança do processo anterior, também aqui pode concluir-se ter existido sobrecarga térmica sobre a aresta de corte, originando a deformação da mesma.

As pastilhas que reuniram os melhores resultados foram as pastilhas 5 e 7 que se pode observar nas figuras 7.15 e 7.16.

Devido à subjetividade da avaliação factual da qualidade da construção do quebra-

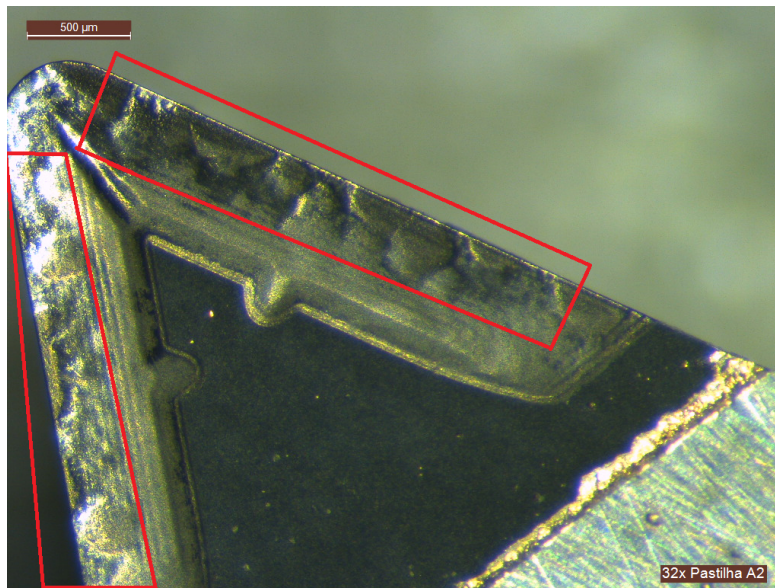


Figura 7.13: Imagem da pastilha A2 após inserção do quebra-apara, ampliada a 32x no microscópio ótico, após processo de limpeza.

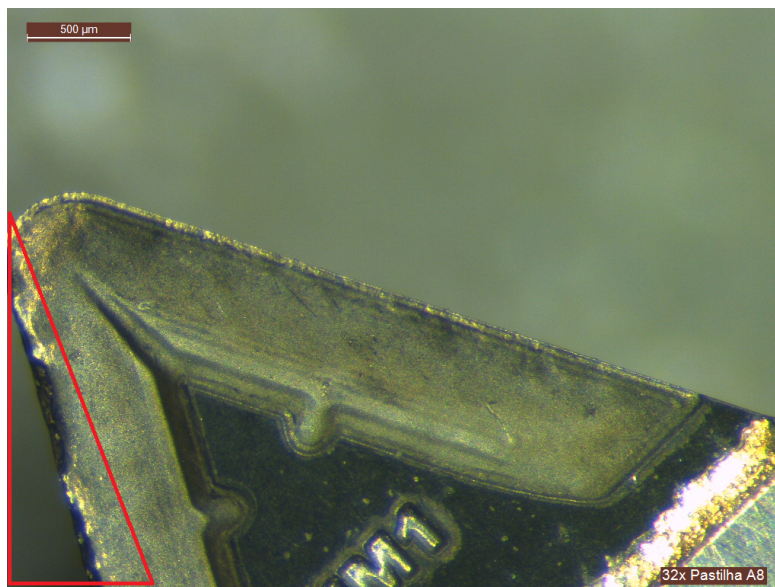


Figura 7.14: Imagem da pastilha A8 após inserção do quebra-apara, ampliada a 32x no microscópio ótico, após processo de limpeza.

apara, apenas podemos comparar com algum rigor a profundidade medida com a profundidade que teoricamente deveríamos obter que é cerca de 0,20 mm assim como o tempo de maquinagem registado, faltando um estudo detalhado sobre a aresta de corte, na influência que a mesma tem em trabalho, apenas podemos concluir que a pastilha que apresenta os melhores resultados apurados é a pastilha nº5, que apresenta um decréscimo significativo no tempo de maquinagem em relação às pastilhas de nível 1 e 3 que registam

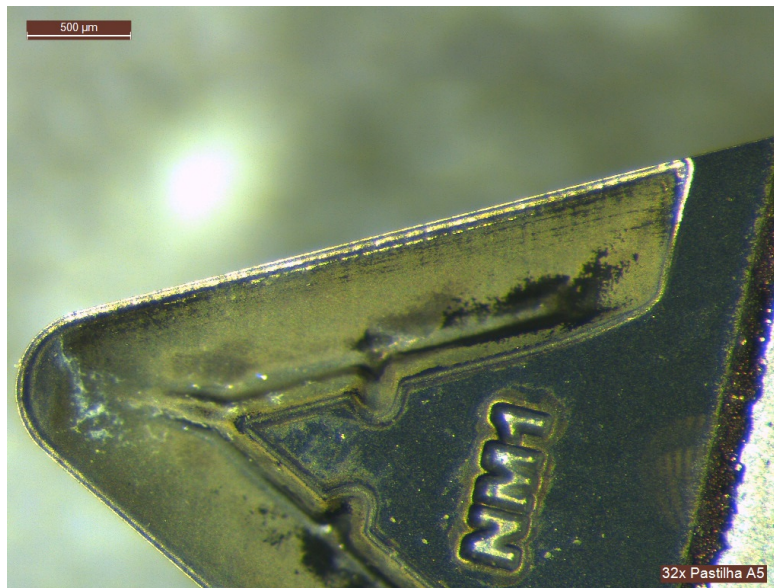


Figura 7.15: Imagem da pastilha A5 após inserção do quebra-apara, ampliadas a 32x no microscópio ótico, após processo de limpeza.

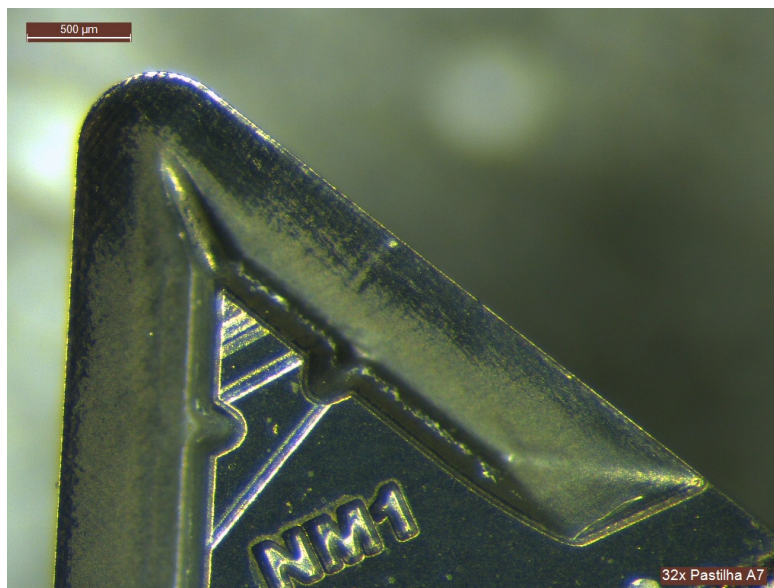


Figura 7.16: Imagem da pastilha A7 após inserção do quebra-apara, ampliadas a 32x no microscópio ótico, após processo de limpeza.

valores superiores, de 69 e 55 segundos respetivamente.

Apesar de não se ter conseguido obter os valores de profundidade das pastilhas de nível 2 e 3, assumindo serem próximas de 0,200 mm, a pastilha nº5 obtém o resultado mais próximo ao valor teórico no menor tempo de maquinagem, como podemos ver na tabela 7.11.

Não obstante o facto da caracterização do quebra-apara ser subjetiva, realizou-se

a análise do método de *Taguchi*, com os componentes profundidade de corte e tempo de maquinagem obtido. Para tal utilizou-se a função: "nominal é melhor" descrita pela equação 7.2

$$10 * \log\left(\frac{Y^2}{s^2}\right) \quad (7.2)$$

para que o valor de profundidade de corte obtido se situasse em torno de 0,200 mm e o tempo de maquinagem pelos 27 segundos.

Tabela 7.11: Tabela comparativa dos resultados originais com a pastilha nº5.

Operação		Nível 1	Nível 2	Nível 3	Pastilha nº5
Desbaste	Potência <i>laser</i> (%)	64	90	75	90
	Profundidade de corte (mm)	0,0064	0,0160	0,0080	0,0160
Acabamento	Potência <i>laser</i> (%)	64	100	75	75
	Profundidade de corte (mm)	0,0064	0,0160	0,0080	0,0064
Resultados	Tempo (s)	69	27	55	27
	Profundidade obtida (mm)	0,1683	-	-	0,201

A tabela 7.12 organiza os fatores e os níveis por ordem crescente como aplicado pelo método de *Taguchi*. Na tabela 7.13 são apresentados os valores do quociente entre o Sinal e o Ruído em relação a cada um dos fatores do processo de ablação.

Pela análise do método de *Taguchi* consegue-se perceber que os parâmetros mais importantes para a otimização são a potência *laser* com 0,055 e a profundidade de corte com 0,050 ambas durante a fase de desbaste. Pode observar-se que os valores que otimizam o quebra-apara durante a fase de desbaste são 90% de potência *laser* e 0,0160 mm de profundidade de corte. Durante a fase de acabamento obteve-se 64% de potência *laser* e profundidade de corte de 0,0080 mm.

Pode observar-se na figura 7.17 o resultado da análise gráfica do método de *Taguchi*.

Pode concluir-se que o valor que mais contribui para a profundidade de corte e o tempo de maquinagem é a potência *laser* durante a fase de desbaste, que contribui com aproximadamente 32,74%. A profundidade de corte que ocorre durante o desbaste é responsável por 29,76%. Estes dois parâmetros juntos correspondem a 62,5% da profundidade de corte obtida, fazendo dos mesmos os fatores mais importantes a ter em consideração na alteração da profundidade que queremos obter. Os restantes fatores embora tenham bastante peso encontram-se relativamente abaixo dos componentes acima referidos.

A análise do método de *Taguchi* em relação ao tempo de maquinagem é clara e atribui a totalidade da responsabilidade do tempo de maquinagem ao fator profundidade de corte durante a fase de desbaste. Com a combinação das duas análises podemos afirmar que,

Tabela 7.12: Compilação de fatores e níveis segundo o método de *Taguchi*.

	Factor	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Desbaste	Potência <i>laser</i> (%)	64	75	90
	Profundidade de corte (mm)	0,0064	0,0080	0,0160
Acabamento	Potência <i>laser</i> (%)	64	75	100
	Profundidade de corte (mm)	0,0064	0,0080	0,0160

Tabela 7.13: Tabela do quociente entre o Sinal e o Ruído para cada fator para o processo de ablação para tempo de maquinagem e profundidade de corte.

Nível	Desbaste		Acabamento	
	Potência <i>laser</i> S/N	Profundidade de corte S/N	Potência <i>laser</i> S/N	Profundidade de corte S/N
1	-2,967	-2,952	-2,916	-2,932
2	-2,921	-2,945	-2,934	-2,919
3	-2,912	-2,903	-2,950	-2,949
Delta	0,055	0,050	0,033	0,030
Percentagem de contribuição	32,74%	29,76%	19,64%	17,86%

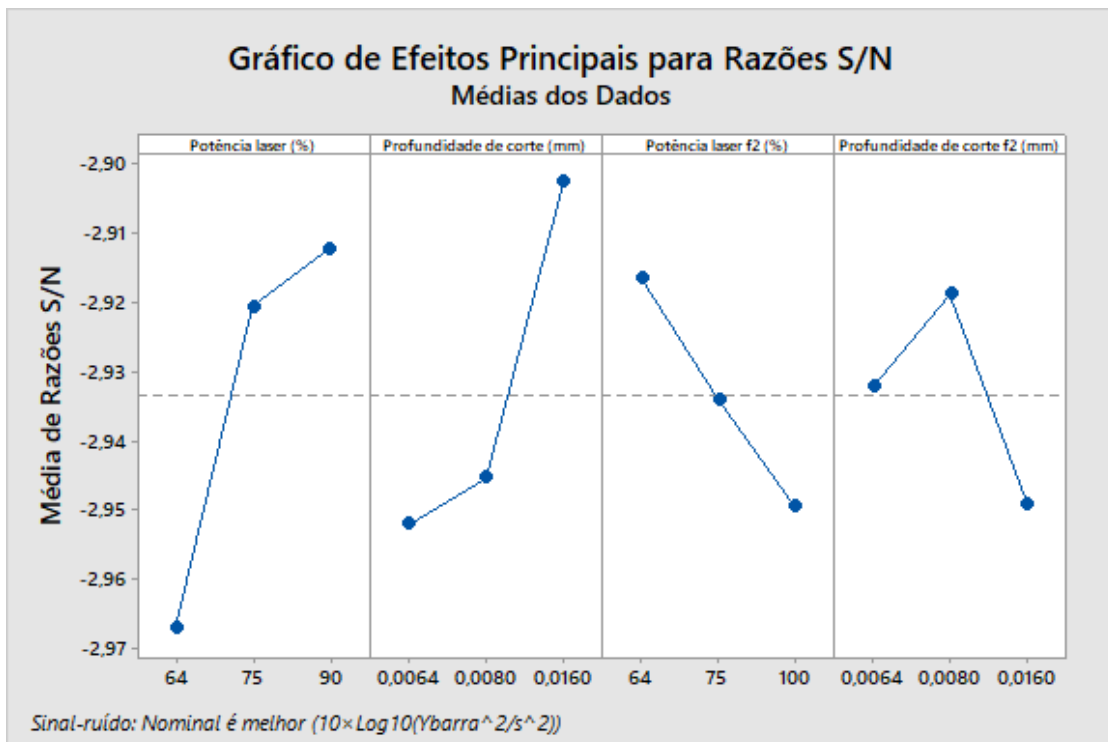


Figura 7.17: Gráfico da análise do método de *Taguchi* aplicado ao processo de ablação, obtido através do *Minitab*.

no processo de ablação, a fase mais importante para o estudo apresentado é a fase de desbaste, onde vamos definir qual o tempo de maquinagem destinado ao quebra-apara e onde conseguimos ter uma perceção da profundidade que iremos obter.

Devido à excessiva utilização de pastilhas específicas para a produção do estudo apresentado neste documento, devido a fatores como: calibrações da máquina utilizada, a situações de ordem laboral ou situações necessárias à realização do projeto, que não foram acauteladas no início do mesmo, não sobraram pastilhas para a execução do quebra-apara com os parâmetros finais otimizados. De forma a contornar este inconveniente executou-se uma regressão linear aplicada à profundidade média onde se obteve 0,202 mm, um valor que se enquadra nos valores de profundidade apresentados. Podemos então concluir que a otimização obtida pelo método de *Taguchi*, propõe a execução da pastilha em 27 segundos.

Capítulo 8

Conclusão

Na indústria, existe uma grande competitividade entre empresas, em especial na metalomecânica, em que o objetivo de cada um é obter a melhor qualidade possível ao mais baixo preço. Para tal, os estudos de otimização de recursos, de tempos de processo e de melhoria contínua representam um dos aspectos mais importantes para tornar uma empresa competitiva no mercado em que se encontra. A pesquisa realizada permitiu obter e aprofundar conhecimentos nesta área específica e foi um pilar importante na realização deste trabalho.

O presente projeto permite-nos retirar conclusões sobre a velocidade linear dos eixos CNC, sobre a velocidade de pulso, a profundidade de corte e sobre a potência *laser* que devem ser utilizados nas fases de desbaste e acabamento na operação de corte *laser* de *PCD*. São apresentadas conclusões que relacionam a potência *laser* e a profundidade de corte escolhidos, aplicadas nas mesmas fases do processo anterior, com o tempo de maquinagem e profundidade de corte obtidos, no processo de ablação que dá origem ao quebra-aperas aplicado a diamante policristalino.

Os ensaios de corte *laser* realizados apresentam bons resultados, cumprindo com os objetivos propostos de otimização de parâmetros. Obteve-se uma economia de tempo de maquinagem de 12,46% aliada a uma diminuição da rugosidade da face cortada (R_a) de 8,38%, por comparação com a pastilha 0 - referência, já de si uma otimização da entidade fornecedora da máquina de corte *laser*. Embora tenha ocorrido um aumento do valor da rugosidade (S_a), medido num perfil perpendicular à aresta de corte, o valor de rugosidade S_a obtido é de 0,1211 μm , o que corresponde a uma rugosidade consideravelmente baixa.

Os componentes que mais alteram o tempo de maquinagem são a profundidade de corte, tendo durante a fase de acabamento uma contribuição de 31,34% e no decorrer da fase de desbaste 27,16% enquanto a velocidade dos eixos CNC, durante a fase de desbaste foi responsável por 21,94%, por comparação com a fase de acabamento que obteve uma contribuição de 16,27% em relação ao tempo de maquinagem. A rugosidade R_a teve como principal responsável o componente Parâmetro.

A combinação das duas variáveis de saída teve como resultado a seguinte otimização de fatores: durante a fase de desbaste, velocidade do eixo CNC de 80 mm/min, velocidade de pulso de 0,8 m/s e profundidade de corte de 0,05 mm; Durante a fase de acabamento obteve-se 0,1 no componente Parâmetro, velocidade do eixo CNC de 80 mm/min, Potência *Laser* de 84% e profundidade de corte de 0,07 mm. A produção da pastilha de *PCD* realizou-se em 4 min e 41 segundos, obteve uma rugosidade (R_a) de 0,1618 μm e apresentando 0,1211 de rugosidade (S_a).

Estudou-se a influência da potência *laser* e da profundidade de corte durante as fases de desbaste e acabamento. A análise do método de *Taguchi* relativamente à profundidade de corte constatou-se que a potência *laser* durante a fase de desbaste é o componente com maior influência, cerca de 32,74%, seguido da profundidade de corte durante a mesma fase. A análise do método de *Taguchi* relativa ao tempo de maquinagem revelou que o único fator que faz alterar o mesmo é a profundidade de corte escolhida durante a fase de desbaste. A pastilha nº5 obteve os melhores resultados da experiência com uma potência *laser* de 90%, uma profundidade de corte de 0,016 mm durante a fase de desbaste, 75% de potência *laser* e profundidade de corte de 0.0064 mm. Devido ao gasto excessivo de peças XDHW, não foi possível verificar se a otimização obtida pelo método de *Taguchi* originava uma profundidade de corte do quebra-apara próximo do valor teórico pretendido, uma vez que o tempo estimado se situa nos 27 segundos.

8.1 Trabalhos Futuros

O estudo produzido neste projeto apresenta uma otimização do processo de corte *laser* de pastilhas de *PCD* e um melhoramento do processo de ablação em pastilhas do mesmo material. No entanto, este foi um estudo algo limitado, quer temporal como tecnologicamente, pelo que devem ser realizados ensaios adicionais do processo de ablação de forma a conseguir-se estudar detalhadamente a influência dos parâmetros sobre a aresta de corte e a influência que a mesma tem em trabalho.

Neste projeto utilizaram-se três níveis de graus de liberdade restritos aos extremos que se encontravam pré-carregados no *software* da máquina, seria interessante produzir-se o mesmo estudo, explorando outras condições de processamento da máquina de corte *laser*, de forma a garantir que se está a extrair todo o seu potencial.

Seria interessante averiguar a utilização dos parâmetros otimizados, aplicados a diamantes com constituição diferente da estudada de forma a perceber se existe influência do material no processo de corte *laser*.

Bibliografia

- [1] Valsider - Empresa especialista no fabrico de componentes em carboneto de tungstênio 2009 (<http://www.valsider.com/pt/tungsten.php>) visitado em março de 2018.
- [2] Pastor H. 1996, Centenaire de la découverte du carbure de tungstène par Henri moissan; historique du développement de ce matériau. *La Revue de Métallurgie-CIT/Science et Génie des Matériaux*, 1997 1537-1552.
- [3] Chermant-J.L. and Osterstock-F. Fracture toughness and fracture of WC-Co composites. *Journal of Materials Science* 1976, vol.11: 1939-1951.
- [4] Meredith-B. and Milner-D.R. Densification Mechanisms in the Tungsten Carbide-Cobalt system. *Powder Metallurgy* 1976 (1): 38-45.
- [5] E.Lardner. Review of current hardmetal technology. *Hardmetal Tecnology* 1970: 122-132.
- [6] Tracey V.A. Nickel in Hardmetals. *Refractory Metals Hard Materials* 1992; 11 (137):149.
- [7] Wikipédia - Metal duro - https://pt.wikipedia.org/wiki/Metal_duro visitado em março de 2018.
- [8] Mitsubishi Metalworking Solutions Company Carbide Materials http://blank.mitsubishicarbide.com/en/technologies/tech_process) visitado em março de 2018.
- [9] Heinztools - Ferramentas de Metal Duro para Maquinagem - <http://www.heinz-tools.com/pastilhas-metal-duro-usinagem> visitado em março de 2018.
- [10] Janes-S. and Bonn-W. Composites. *Handbook of Ceramics - Ceramic Monographs*, 1979.
- [11] Qi Wu, JunWang and Chuanzhen Huang, 2013, Analysis of the machining performance and surface integrity in laser milling of polycrystalline diamonds.
- [12] Wikipedia - Diamante sintético - https://en.wikipedia.org/wiki/Synthetic_diamond visitado em janeiro de 2018.
- [13] Eversole, W. G. "Synthesis of diamond" *U.S. Patent 3,030,188*, 17 de Abril de 1962.
- [14] Deryagin, B. V. and Fedoseev, D. V.; Fedoseev (1970). "Epitaxial Synthesis of Diamond in the Metastable Region". *Institute of Physical Chemistry, the USSR Academy of Sciences, Moscow* 1970,39:9, 783-788.

- [15] Spear, K. E. Dismukes, J. P. (1994). *Synthetic diamond* ISBN:0471535893.
- [16] Almeida F.A., "Diamante CVD nano e microcristalino para corte de materiais abrasivos" *Tese de doutoramento, Universidade de Aveiro*, 2007.
- [17] Lammer A., "Mechanical properties of polycrystalline diamonds", *Materials Science and Technology* Vol. 4 (1988), 949-955.
- [18] PALBIT - Especialistas em soluções de maquinagem - <http://www.palbit.pt>, visitado em janeiro de 2018.
- [19] ILJIN Diamond - Produtores de diamante - http://www.iljindiamond.com/eng/product/prd_info.jsp?cd=101117, visitado em fevereiro de 2018.
- [20] APT - Associated Production Tools, - <https://www.shop-apt.co.uk/pcd-diamond-turning-inserts/dcmt-070204-pcd-1500-diamond-turning-insert-for-aluminium-alloys-with-12-si-content.html>, visitado em março de 2018.
- [21] Dold, Claus A., Picosecond laser processing of diamond cutting edges - *Doctoral Thesis ETH Zurich*-2013.
- [22] Dold, Claus, et. al. Comparison of ground and laser machined polycrystalline diamond (PCD) tools in cutting carbon fiber reinforced plastics (CFRP) for aircraft structures - 2012.
- [23] Wegener K. et. al. "Conditioning and monitoring of grinding wheels", *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60 (2011):757-777.
- [24] Eberle, Gregory Dold, Claus Wegener, Konrad, (2015), Laser fabrication of diamond micro-cutting tool-related geometries using a high-numerical aperture micro-scanning system, Institute of Machine Tools and Manufacturing (IWF), ETH Zurich.
- [25] Louis Beletht - Swiss cutting tools - <http://www.louisbelet.ch/en/products-louis-belet/cutting-tools/special-tools/form-cutters-pcd/>, visitado em fevereiro de 2018.
- [26] Garwin, Laura e Lincoln, Tim. "The first laser" *A Century of Nature: Twenty-One Discoveries that Changed Science and the World*, Universidade de Chicago.
- [27] Wikipédia - Laser - <https://en.wikipedia.org/wiki/Laser>, visitado em fevereiro de 2018.
- [28] Asibu Elijah, Principles of laser material processing, *John Wiley Sons Inc.*, 2009.
- [29] Lasers Basics: Propriedade dos lasers, <http://www.worldoflasers.com/laserproperties.htm>, visitado em março de 2018.
- [30] Micro-Optics Laboratory: Coherence, <http://optics.hanyang.ac.kr/~shsong/5-Coherence.pdf>, visitado em março de 2018.
- [31] Gustav Lindgren, Amplificação laser, Projecção e População Inversa, https://www.aphys.kth.se/polopoly_fs/1.551652!/Presentation%2C%20March%2012th%2C%20Gustav%20Lindgren.pdf. visitado em abril de 2018.

- [32] Brettschneider Corinna, Rath Wolfram, Introduction to Industrial Laser Materials Processing Rofin, *Laser Technik Journal*, Hamburg, 2014.
- [33] Jelvani S, Saeedi H, Numerical investigation of a fast-axial-flow CW CO₂ laser, *Journal of Optics Laser Technology*, Volume 40, Issue 3, pp. 459-465, 2007.
- [34] Hukgel H, New solid-state lasers and their application potentials, *Journal of Optics and Lasers in Engineering*, Volume 34, Issues 4-6, pp. 213-229, 2000.
- [35] Steen W, Mazumder J, Laser Material Processing, *Springer*, Fourth Edition, 2010, ISBN 978-1-84996-061-8.
- [36] Berkmanns J, Faerber M, Facts About: Laser Technology - Laser Cutting, [http://www.laserdeal.com/techInfoFiles/Facts%20about%20Laser%20Cutting%20engl\[1\].%20Drucklayout%2023.06.03.pdf](http://www.laserdeal.com/techInfoFiles/Facts%20about%20Laser%20Cutting%20engl[1].%20Drucklayout%2023.06.03.pdf), visitado em março de 2018
- [37] Bralla James, Design For Manufacturability Handbook: Flame-Cut Parts, McGraw-Hill, Second edition, *The McGraw-Hill Companies*, 199, ISBN: 97800700713912004.
- [38] F. Quintero, A. Riveiro, F. Lusquiños, R. Comesaña, J. Pou., Feasibility Study on Laser Cutting of Phenolic Resin Boards, *Proceedings of the Sixth International WLT Conference on Lasers in Manufacturing*, Volume 12, Part A, pp. 578-583, 2011.
- [39] Singh P., Advantages of laser cutting sheet metal, *The production Engineer journal*, 1984.
- [40] Sonkushre P, Advantages and Disadvantages of Laser Cutting, <http://www.buzzle.com/articles/advantages-and-disadvantages-of-lasercutting.htmlreferenced>, visitado em março de 2018.
- [41] Bull SJ and Matthews A. Diamond for wear and corrosion applications, *Diam Relat Mater* 1992; 1: 1049-1064.
- [42] Laser processing of coarse grain polycrystalline diamond (PCD) cutting tool inserts using picosecond laser pulses, ETH Zurich, Elsevier B.V. 2013
- [43] Harrison, P. M., Henry, M., Brownell, M., 2006. Laser processing of polycrystalline diamond, tungsten carbide and a related composite material, *Journal of Laser Applications*, p. 117-126.
- [44] Li, Z., Wang, J., Wu, Q., 2012. Ultrashort pulsed laser micromachining of polycrystalline diamond, *Advanced Materials Research* 497, p. 220-224
- [45] Wu, Q., Wang, J., 2010. Development in laser polishing of polycrystalline diamond tools, *Advanced Materials Research* 135, p. 1-6.
- [46] Taguchi G, Konishi S, Taguchi Methods, orthogonal arrays and linear graphs, tools for quality American supplier institute, American Supplier Institute; 1987 [p. 8-35].
- [47] Rao, Ravella Sreenivas; C. Ganesh Kumar, R. Shetty Prakasham, Phil J. Hobbs, The Taguchi Methodology as a statistical tool for biotechnological applications: A critical appraisal, *Biotechnology Journal*, 3 (4):510-523.

- [48] Montgomery, D. C. - Design and Analysis of experiments, *John Wiley Sons Inc*, 3ª Edição, 1991.
- [49] Park, S. H. - Robust Design and Analysis for Quality Engineering, *Chapman Hall*, First Edition, 1996.
- [50] Brecher, Christian et al. - Laser Roughing of PCD - Physics Procedia 56 (2014) 1107 ? 1114 *8th International Conference on Photonic Technologies LANE* - Elsevier B.V. 2014
- [51] Ed Sinkora, Advance Manufacturing, Laser ablation to the rescue on super-hard tools - <https://advancedmanufacturing.org/buck-rogers-blasts-toolroom/>, visitado em março de 2018.
- [52] Rede nacional de microscopia eletrónica, Universidade de Aveiro, <http://www.ua.pt/rnme/PageGallery.aspx?id=164>, visitado em maio de 2018.
- [53] Europages - Plataforma de comércio, <https://www.europages.co.uk/Leica-S8-AP0/LEICA-MICROSYSTEMS/cpid-5708166.html>, visitado em maio de 2018.
- [54] Willrich Precision - Aparelhos de metrologia - <https://willrich.com/wp-content/uploads/2014/07/Tesa-Rugosurf-10g-Surface-Roughness-Gage.pdf>, visitado em maio de 2018.
- [55] Direct industry - Metrologia industrial - <https://www.directindustry.es/prod/sensofar/product-112777-1156045.html>, visitado em abril de 2018.
- [56] MEDE - Instrumentos de medição -<https://www.medeinstrumentos.com.br/produto/relogio-comparador-digital-idh-idf-mitutoyo/>, visitado em abril de 2018.
- [57] M.H. Cetin, B. Ozcelik, E. Kuram, E. Demirbas, Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method, *Journal Cleaner Prod* vol.19 (2011) 2049-2056.
- [58] Minitab - Suporte ao Minitab 2018 - <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/19/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/taguchi/analyze-taguchi-design/methods-and-formulas/methods-and-formulas/>, visitado ao longo de todo o projeto 2018-2019.