

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

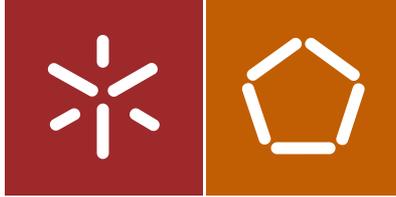
Bruno Miguel Pereira Guimarães

Produção e caracterização de ferramentas
de corte obtidas por tecnologia laser

Bruno Miguel Pereira Guimarães
Produção e caracterização de ferramentas de corte
obtidas por tecnologia laser

UMinho | 2018

outubro de 2018



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Miguel Pereira Guimarães

Produção e caracterização de ferramentas
de corte obtidas por tecnologia laser

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia de Materiais

Trabalho efectuado sob a orientação de
Doutora Maria Georgina Macedo Miranda
Doutora Cristina Maria da Silva Fernandes
Professor Doutor Filipe Samuel Silva

DECLARAÇÃO

Nome: Bruno Miguel Pereira Guimarães

Endereço eletrónico: brunopereiraguimaraes@hotmail.com Telefone: 910330998

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 14793668

Título da dissertação: Produção e caracterização de ferramentas de corte obtidas por tecnologia laser

Orientadores:

Professora Doutora Maria Georgina Macedo Miranda

Doutora Cristina Maria da Silva Fernandes

Professor Doutor Filipe Samuel Silva

Ano de conclusão: 2018

Mestrado Integrado em Engenharia de Materiais

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA TESE/TRABALHO.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura:

"The evolution of Man passes, necessarily, through the search for knowledge"

Sun Tzu

AGRADECIMENTOS

A realização da minha dissertação de mestrado seria muito difícil e penosa se eu contasse apenas com o meu empenho, como em todos os projetos a que nos dedicamos durante a vida, o apoio de outras pessoas é essencial e em muito suaviza o caminho necessário percorrer para a realização dos mesmos. Neste aspeto considero-me um privilegiado, pois tive o apoio de inúmeras pessoas e este foi fulcral para a realização da minha dissertação. A todas eles devo a minha gratidão e como tal aproveito este espaço para expressar os meus sinceros agradecimentos.

Um agradecimento especial à minha orientadora, Doutora Georgina Miranda, pela sua dedicação, total disponibilidade, paciência e simpatia com que sempre me recebeu, pelas suas sugestões sempre pertinentes, pelos seus ensinamentos e pelo seu apoio sempre constante.

Ao meu co-orientador, Professor Doutor Filipe Samuel Silva, um especial obrigado pela oportunidade de realização desta dissertação, pelos conselhos sábios e pela partilha de conhecimento.

À empresa Palbit S.A., em especial ao Engenheiro Daniel Figueiredo e à Doutora Cristina Fernandes, agradeço pela oportunidade proporcionada, pela partilha de ideias, pelo apoio e disponibilidade que sempre demonstraram, pelo aconselhamento técnico e científico e pelo fornecimento da matéria-prima necessária para a realização desta dissertação.

Ao professor Óscar Carvalho pelo seu apoio, colaboração e ajuda na resolução de todos os problemas que fui enfrentando ao longo do trabalho experimental.

Aos colegas do Laboratório de Micro Fabricação e Sistemas Integrados, obrigado pelo apoio, ajuda e boa disposição manifestados diariamente.

Por fim, quero deixar um agradecimento especial aos meus pais que sempre apostaram na minha formação e pelo apoio incondicional em toda a minha vida académica, tornando possível a concretização desta fase da minha vida.

Este trabalho foi apoiado pela FCT através do projeto POCI-01-0145-FEDER-030353 (SMARTCUT), PTDC/EMS-TEC/5422/2014 (ADAPTPROSTHESIS) e também pelo projeto NORTE 01-0145_FEDER-000018 (HAMaBICo). Além disso, este trabalho foi financiado pela FCT com o projeto de referência UID/EEA/04436/2013, por fundos FEDER através do COMPETE 2020-Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) com o projeto de referência POCI-01-0145-FEDER-006941.

Cofinanciado por:



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional



A todos, o meu sincero obrigado.

RESUMO

A indústria das ferramentas de corte enfrenta atualmente grandes desafios uma vez que nos últimos anos, novos materiais com elevada dureza e baixa condutividade térmica estão, cada vez mais, a ser utilizados. Este panorama leva a que seja necessário desenvolver novas soluções usando materiais e processos de fabrico inovadores.

A baixa condutividade térmica destes materiais resulta num rápido aumento da temperatura na zona de corte durante o processo de maquinagem induzindo assim uma taxa de desgaste rápida na ferramenta de corte, reduzindo a sua vida útil. Deste modo, a temperatura na aresta de corte desempenha um papel crucial durante o processo de maquinagem, procurando esta indústria novas formas para a reduzir eficazmente. A adição de materiais condutores à ferramenta de corte pode aumentar a sua condutividade térmica, permitindo reduzir a temperatura na aresta de corte e consequentemente o seu desgaste, aumentando o seu tempo de vida útil.

Este trabalho consiste no desenvolvimento e produção de ferramentas de corte de metal duro (WC-Co) com canais de escoamento de calor que permitam aumentar a capacidade de extração de calor destas ferramentas. Este trabalho foi realizado em colaboração com a empresa PALBIT S.A. que pretende incorporar nas suas ferramentas de corte soluções que reduzam estes problemas.

Inicialmente foram desenvolvidos vários designs para os canais de escoamento, cuja eficácia quanto à extração de calor foi aferida por via de simulação numérica. Partindo de compactos a verde, foi selecionada a tecnologia laser para a maquinagem dos canais de escoamento de calor, devido à versatilidade desta tecnologia. Após a maquinagem a laser estes compactos foram sinterizados e subsequentemente os canais de escoamento de calor foram preenchidos com materiais condutores.

Os parâmetros de processamento utilizados na maquinagem a laser, especialmente a potência, velocidade de varrimento e espaçamento entre linhas, foram aferidos, uma vez que influenciam significativamente o processo de maquinagem, nomeadamente a qualidade do acabamento superficial, bem como a capacidade de remoção de material por parte do laser.

A condutividade térmica das ferramentas desenvolvidas e produzidas foi obtida a partir da medição da resistividade elétrica a quatro pontos, usando a equação de Wiedemann-Franz.

Os resultados mostraram que a adição de materiais condutores permite aumentar a condutividade térmica do metal duro em 110 e 130 % quando se adiciona cobre ou alumínio, respetivamente.

Palavras-Chave: Ferramentas de corte; Metal duro; Maquinagem a laser; Escoamento de calor

ABSTRACT

The cutting tool industry is currently facing major challenges as new materials with high hardness and low thermal conductivity are increasingly being used in recent years. This scenario leads to the need to develop new solutions using innovative materials and manufacturing processes.

The low thermal conductivity of these materials results in a rapid increase in temperature in the cutting zone during the machining process, thereby inducing a rapid wear rate on the cutting tool, reducing its life time. In this way, the temperature at the cutting edge plays a crucial role during the machining process, seeking this industry new ways to effectively reduce it. The addition of conductive materials to the cutting tool can increase its thermal conductivity, allowing to reduce the temperature at the cutting edge and consequently its wear, increasing its life time.

This work addresses the development and production of carbide cutting tools (WC-Co) having heat transfer channels to increase the heat extraction capacity of these tools. This work was performed in collaboration with the company PALBIT S.A., that intends to integrate in their cutting tools the solutions that allow to reduce the abovementioned problems.

Initially, several designs were developed for the channels, whose efficiency in the extraction of heat was measured by means of numerical simulation. Starting from a green body, laser technology was selected for the machining of these heat transfer channels, due to the versatility of this technology. After laser machining, these compacts were sintered and subsequently the heat transfer channels were filled with conductive materials.

The processing parameters used for the laser machining, especially the power, scanning speed and line spacing, were evaluated as they significantly influence the machining process, namely the surface finish quality as well as the ability of the laser to remove material.

The thermal conductivity of the tools developed and produced was obtained by measuring the electrical resistivity at four points, using the Wiedemann-Franz equation.

The results showed that the addition of conductive materials allows to increase the thermal conductivity of hard metal by 110 and 130% when copper or aluminum is added, respectively.

Keywords: Cutting tools; Hard metal; Laser machinig; Heat transfer

ÍNDICE

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Índice.....	xi
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xix
1. Enquadramento e Objetivos.....	1
1.1. Enquadramento.....	2
1.2. Objetivos.....	3
2. Estado da Arte.....	5
2.1. Ferramentas de corte.....	6
2.1.1. Introdução.....	6
2.1.2. Mercado das Ferramentas de Corte.....	10
2.2. Ferramentas de corte convencionais.....	11
2.2.1. Carbonetos Sinterizados (Metal Duro).....	12
2.3. Falhas em Ferramentas de Corte.....	17
2.4. Metalurgia dos pós.....	23
2.5. Tecnologia Laser.....	26
2.5.1. Maquinagem a Laser.....	28
2.5.2. Maquinagem a Verde.....	30
2.6. Condutividade Térmica em Ferramentas de Corte.....	31
2.7. Ferramentas de Corte Inteligentes.....	35
3. Materiais e Métodos.....	39
3.1. Materiais.....	40
3.1.1. Metal Duro.....	40
3.1.2. Materiais Condutores.....	41

3.2.	Métodos.....	41
3.2.1.	Simulação Numérica	42
3.2.2.	Processamento.....	44
1.	Prensagem de pós	44
2.	Maquinagem a laser.....	45
3.	Desparafinação e Sinterização.....	51
4.	Impregnação com Materiais Condutores.....	51
3.3.	Técnicas de Caracterização	52
3.3.1.	Microscopia Eletrônica de Varrimento (SEM)	52
3.3.2.	Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS).....	54
3.3.3.	Difração de Raios-X (XRD).....	55
3.3.4.	Medição da Resistividade Elétrica.....	57
4.	Resultados e Discussão	59
4.1.	Simulação Numérica	60
4.2.	Influência dos parâmetros do laser na maquinagem	65
4.3.	Impregnação com Materiais Condutores.....	80
4.4.	Resistividade Elétrica.....	82
5.	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	85
5.1.	Conclusões	86
5.2.	Trabalhos Futuros	87
	Bibliografia	89
	Anexos	95
	Anexo I – Densidade de Energia do Estudo Complementar.....	96
	Anexo II – Variações do Design f1).....	101
	Anexo III – Espetros EDS	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de ferramentas de corte [7].....	6
Figura 2: Variação da dureza com a temperatura para alguns materiais utilizados em ferramentas de corte [8]	7
Figura 3: Vários parâmetros dos processos de maquinagem que influenciam a maquinabilidade (adaptado de [4]).....	8
Figura 4: Esquema exemplificativo dos movimentos presentes no torneamento (adaptado de [9])	8
Figura 5: Exemplo de diferentes geometrias de pastilhas de corte para acabamento, semi-desbaste e desbaste (adaptado de [7])	9
Figura 6: Diagrama correspondente à zona de trabalho de cada pastilha (adaptado de [8]).....	9
Figura 7: Esquema exemplificativo dos movimentos presentes numa operação de fresagem [10]	9
Figura 8: Consumo global de ferramentas de corte por país [11].....	10
Figura 9: Consumo global de ferramentas de corte por tipo de material em 2015 [11]	10
Figura 10: Exemplos de revestimentos utilizados em ferramentas de corte [7].....	12
Figura 11: Efeito do teor de cobalto e do tamanho médio de grão de WC na: a) Dureza; b) Resistência ao desgaste; c) Tenacidade à fratura [21]	13
Figura 12: a) Diagrama pseudo-binário do WC-Co [17]; b) Contração vs temperatura para WC-6% Co [25].....	14
Figura 13: Microestrutura típica do WC-Co [28].....	15
Figura 14: Vida da ferramenta de corte vs velocidade de corte para vários revestimentos produzidos por PVD [2]	16
Figura 15: Sistema ISO (composição e propriedades) [2]	17
Figura 16: Fontes de calor no corte ortogonal [31]	18
Figura 17: Efeitos das condições de corte na vida útil da ferramenta de corte [8].....	18
Figura 18: Curvas de vida útil da ferramenta para diferentes materiais [35].....	19
Figura 19: a) Desgaste por deformação plástica [14]; b) Imagem SEM de uma aresta de corte deformada plasticamente [32]	20
Figura 20: a) Desgaste na face de ataque [14]; b) Imagem SEM do desgaste na face de ataque [32]	20
Figura 21: a) Desgaste na face de saída [14]; b) Imagem SEM do desgaste na face de saída [32]	21
Figura 22: a) Desgaste em V [14]; b) Imagem SEM do desgaste em V [32]	21
Figura 23: a) Aresta postiça de corte [14]; b) Imagem SEM da aresta postiça de corte [32]	22

Figura 24: a) Fratura térmica [14]; b) Imagem SEM de fratura térmica [32].....	22
Figura 25: a) Fratura por fadiga mecânica [14]; b) Imagem SEM da fratura por fadiga mecânica [32]	22
Figura 26: Comparação entre a utilização de material para várias tecnologias de manufatura [38]....	23
Figura 27: Esquema representativo da técnica de metalurgia dos pós (adaptado de [36])	23
Figura 28: a) Efeito da aplicação da pressão durante a compactação; b) Densidade do compacto em função da pressão aplicada [27]	24
Figura 29: Produção estimada (em mil milhões de euros) de componentes por metalurgia dos pós na Europa em 2016 [38].....	26
Figura 30: Esquema de um sistema com laser Nd:YAG [35].....	27
Figura 31: Efeitos da interação do laser com o material [44]	28
Figura 32: Esquema representativo da maquinagem a laser a uma, duas e três dimensões [44]	29
Figura 33: Maquinagem a laser a três dimensões [46]	29
Figura 34: Microcavidade maquinada a verde em alumina [53]	30
Figura 35: Distribuição típica de temperatura na zona de corte [63]	32
Figura 36: Variação da condutividade térmica do WC-Co em função da temperatura, para várias classes e tamanhos de grão [21]	32
Figura 37: Variação da resistividade elétrica do WC-Co com a temperatura e com o teor em Co [67] .	33
Figura 38: Evolução da temperatura em função da velocidade de corte: a) face de saída; b) interface ferramenta/apara [35]	34
Figura 39: Geometria e tamanho do pó de WC-Co utilizado	40
Figura 40: Difractograma de raios-X do pó de WC-Co utilizado.....	40
Figura 41: a) Grânulos de cobre utilizados; b) Pó de alumínio utilizado	41
Figura 42: Fluxograma com a metodologia utilizada na parte experimental	41
Figura 43: Ferramenta de corte de metal duro	42
Figura 44: Malha utilizada na simulação numérica	43
Figura 45: Equipamento de prensagem (MEGA)	44
Figura 46: Matriz utilizada na prensagem das amostras	44
Figura 47: Geometria e dimensões das amostras obtidas.....	45
Figura 48: Equipamento laser Nd:YAG (Sisma).....	45
Figura 49: Representação esquemática do efeito da amplitude do wobble na maquinagem a laser	46
Figura 50: Representação do design utilizado no estudo inicial	47
Figura 51: Representação do design utilizado no estudo complementar.....	49

Figura 52: Representação do padrão final	50
Figura 53: Equipamento de soldadura por pontos (Electrex)	52
Figura 54: Esquema representativo do SEM.....	52
Figura 55: Equipamento SEM	53
Figura 56: Difração de raios-X segundo a lei de Bragg.....	55
Figura 57: Equipamento XRD.....	56
Figura 58: Esquema representativo da técnica de medição da resistividade elétrica a quatro pontos [93]	57
Figura 59: Equipamento de medição da resistividade elétrica a quatro pontos	58
Figura 60: Designs testados nas simulações numéricas para canais de escoamento de calor	61
Figura 61: Resultados das simulações numéricas dos designs a) a f)	61
Figura 62: Design f1), com 500 μm de profundidade.....	62
Figura 63: Resultados das simulações numéricas realizadas para o design f1), em comparação com os designs f) e a)	62
Figura 64: Resultados das simulações para diferentes materiais	63
Figura 65: Rasgos obtidos usando uma passagem de laser com densidade de energia de 0,01 J/mm e usando i1) $v = 64 \text{ mm/s}$, $P = 0,75 \text{ W}$; i6) $v = 128 \text{ mm/s}$, $P = 1,5 \text{ W}$	68
Figura 66: Rasgos obtidos usando oito passagens de laser com densidade de energia de 0,19 J/mm e usando i2) $v = 64 \text{ mm/s}$, $P = 1,5 \text{ W}$; i12) $v = 256 \text{ mm/s}$, $P = 6 \text{ W}$	68
Figura 67: Rasgos obtidos usando dezasseis passagens de laser para uma densidade de energia de 0,38 J/mm e usando i2) $v = 64 \text{ mm/s}$, $P = 1,5 \text{ W}$; i7) $v = 128 \text{ mm/s}$, $P = 3 \text{ W}$	69
Figura 68: Resultados do estudo complementar: c1)	70
Figura 69: Resultados do estudo complementar: c2)	71
Figura 70: Resultados do estudo complementar: c3)	72
Figura 71: Resultados do estudo complementar: c4)	72
Figura 72: Resultados do estudo complementar: c5)	73
Figura 73: Resultados do estudo complementar: c6)	73
Figura 74: Resultados do estudo complementar: c7)	74
Figura 75: Resultados do estudo complementar: c8)	74
Figura 76: Resultados do estudo complementar: c9)	75
Figura 77: Resultados do estudo complementar: c10)	75
Figura 78: Exemplo de uma amostra com a geometria maquinada a laser	77

Figura 79: Imagem SEM do padrão maquinado antes e após sinterização para a amostra 4 indicada na Tabela 14.....	79
Figura 80: Acabamento da geometria maquinada: a) com wobble; b) sem wobble.....	79
Figura 81: Imagens SEM das amostras de WC-Co impregnadas com cobre	80
Figura 82: Imagens SEM das amostras de WC-Co impregnadas com alumínio.....	81
Figura 83: Variações do design f1)	101
Figura 84: Resultados das simulações numéricas utilizando variações do design f1).....	102
Figura 85: Espetro EDS de z1 da amostra impregnada com cobre.....	103
Figura 86: Espetro EDS de z2 da amostra impregnada com cobre.....	103
Figura 87: Espetro EDS de z3 da amostra impregnada com cobre.....	104
Figura 88: Espetro EDS de z1 da amostra impregnada com alumínio	104
Figura 89: Espetro EDS de z2 da amostra impregnada com alumínio	105
Figura 90: Espetro EDS de z3 da amostra impregnada com alumínio	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades de alguns materiais utilizados para ferramentas de corte [4]	11
Tabela 2: Tipos de lasers e suas características [37]	28
Tabela 3: Algumas propriedades do cobre [69]	35
Tabela 4: Comparação entre os valores da condutividade térmica e preço de alguns metais	35
Tabela 5: Parâmetros térmicos dos materiais utilizados nas simulações numéricas	42
Tabela 6: Características do laser Nd:YAG (Sisma)	46
Tabela 7: Parâmetros utilizados no estudo inicial	48
Tabela 8: Parâmetros utilizados no estudo complementar	50
Tabela 9: Parâmetros finais para a maquinagem a verde da geometria final	51
Tabela 10: Materiais e propriedades utilizadas nas simulações numéricas.....	63
Tabela 11: Resultados do estudo inicial: i1), i2), i3) e i4).....	65
Tabela 12: Resultados do estudo inicial: i5), i6), i7) e i8).....	66
Tabela 13: Resultados do estudo inicial: i9), i10), i11) e i12)	67
Tabela 14: Quadro resumo do estudo inicial (condições e resultados)	69
Tabela 15: Quadro resumo do estudo complementar (condições e resultados)	76
Tabela 16: Imagens SEM das geometrias maquinadas (verde vs sinterizado).....	77
Tabela 17: Composição química (% em peso) das zonas indicadas na Figura 81	80
Tabela 18: Composição química (% em peso) das zonas indicadas na Figura 82	81
Tabela 19: Resistividade elétrica das amostras.....	82
Tabela 20: Condutividade térmica das amostras	82

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

- Al – Alumínio
- CAD – Computer Aided Design
- CBN – Cubic Boron Nitride
- CNC – Computer Numerical Control
- Co – Cobalt
- CO₂ - Dióxido de Carbono
- Cu – Cobre
- CVD – Chemical Vapor Deposition
- EDS – Energy Dispersive Spectroscopy
- EPMA – European Powder Metallurgy Association
- HSS – High Speed Steel
- HV – Dureza Vickers
- LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
- Nd:YAG – Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet
- PCD – Polycrystalline Diamond
- PVD – Physical Vapor Deposition
- SEM – Scanning Electron Microscopy
- SinterHIP – Sintering Hot Isostatic Pressure
- XRD – X-ray Diffraction
- WC – Tungsten Carbide

1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

Neste capítulo é feito um enquadramento das ferramentas de corte no qual se pretende esclarecer os problemas e os desafios que esta indústria enfrenta. Para além disso são definidos os objetivos deste trabalho e todas as etapas para a sua realização.

1.1. Enquadramento

Atualmente, a indústria de manufatura de ferramentas de corte é caracterizada por uma competitividade extremamente elevada, em que a evolução dos processos produtivos passa, neste momento, pela sua personalização, tendência oposta à produção em série. O domínio das tecnologias de produção, a capacidade para desenvolver novos produtos e uma maior eficiência possibilitam uma maior flexibilidade permitindo uma reação rápida à necessidade de desenvolvimento e implementação em fábrica de um novo produto e conseqüentemente uma maior inovação. A otimização dos recursos produtivos, por redução dos tempos improdutivos, a melhor utilização dos equipamentos e ferramentas, é um fator de aumento de produtividade.

Esta indústria esforça-se constantemente para diminuir os seus custos de produção e aumentar a qualidade das peças maquinadas, pois a procura por produtos com elevada tolerância dimensional tem aumentando rapidamente. A crescente necessidade de aumentar a produtividade, isto é, melhorar o tempo de vida da ferramenta de corte e otimizar a taxa de produção, de maquinar eficientemente novos materiais e mais difíceis, de melhorar a qualidade e de diminuir o desgaste tem sido a força motriz por trás do desenvolvimento de materiais para ferramentas de corte, e por isso, uma forte investigação tem sido realizada nesta área procurando substituir os materiais utilizados e até as técnicas de processamento com vista à otimização dos processos ou dos produtos [1,2]. Inúmeras ferramentas de corte foram desenvolvidas desde que o primeiro material de ferramenta de corte adequado para uso em corte de metal, aço carbono, foi desenvolvido há mais de um século, fazendo com que hoje em dia uma operação de maquinagem seja exequível em cerca de 1% do tempo que era necessário no início do século XX [3,4].

A temperatura na aresta de corte desempenha um papel crucial durante o processo de maquinagem. A elevada temperatura gerada devido às grandes deformações plásticas durante o processo de maquinagem induz uma taxa de desgaste rápida na ferramenta, o que resulta num tempo de vida reduzido. Assim, a indústria tem procurado novas formas de reduzir essa temperatura, de forma a aumentar o tempo de vida útil da ferramenta de corte [5,6].

O presente estudo, visa, utilizando a tecnologia laser, o desenvolvimento e produção de ferramentas de corte de metal duro (WC-Co) com canais de escoamento de calor, de modo a aumentar a capacidade de extração de calor destas ferramentas. Neste estudo pretende-se otimizar os parâmetros de processamento para produzir estas ferramentas, partindo de compactos a verde, que são maquinados a verde, sinterizados e preenchidos com materiais condutores.

A empresa Palbit S.A. colaborou ativamente no desenvolvimento deste projeto. A PALBIT S.A. procura diariamente desenvolver ferramentas de corte da mais alta qualidade, tendo começado em 1916 na exploração mineira e se tornado produtora de ferramentas de corte de metal duro em 1952. As suas principais áreas de negócio são as ferramentas de corte, ferramentas anti-desgaste e ferramentas para tratamento de pedra.

Este estudo revela-se um desafio bastante motivador dado o enorme potencial da utilização da tecnologia laser para maquinagem e o caráter inovador da utilização desta tecnologia na indústria de manufatura.

Na presente dissertação, após o enquadramento e objetivos, seguem-se quatro capítulos: o primeiro trata do estado da arte, em que são abordadas as ferramentas de corte, o seu mercado e as suas técnicas de produção, bem como a maquinagem a laser; no segundo capítulo são, resumidamente, descritas as técnicas de caracterização utilizadas, bem como as condições experimentais de processamento; sendo seguidamente apresentados e discutidos os resultados do estudo. A presente dissertação termina com um capítulo dedicado às conclusões e perspetivas para trabalho futuro.

1.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é a produção e caracterização de ferramentas de corte obtidas por tecnologia laser. Para alcançar este objetivo, primeiramente é necessário traçar objetivos específicos que são apresentados na lista que se segue:

- Design de ferramentas de corte incorporando canais de escoamento de calor e a sua simulação térmica;
- Fabrico destas ferramentas de corte utilizando tecnologia laser;
- Estudo da influência dos parâmetros do laser na maquinagem a verde do metal duro;
- Produção de canais de escoamento de calor utilizando os parâmetros ótimos de processamento;
- Caracterização das ferramentas de corte obtidas quanto à sua capacidade de extração de calor e comparação com as ferramentas tradicionais;

2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo pretende-se evidenciar os fundamentos teóricos sobre as ferramentas de corte e o seu mercado procurando compreender os estudos já existentes na literatura sobre este assunto. Efetua-se também uma revisão bibliográfica relativamente às tecnologias de metalurgia dos pós e maquinagem a laser.

2.1. Ferramentas de corte

2.1.1. Introdução

A ferramenta de corte é um elemento base fundamental no processo de maquinagem de um componente. Esta não executa apenas a ação de corte, mas também controla o acabamento superficial e a precisão dimensional a obter [1]. Na Figura 1 encontram-se alguns exemplos de ferramentas de corte.



Figura 1: Exemplo de ferramentas de corte [7]

Historicamente, a evolução dos materiais utilizados no fabrico de ferramentas de corte procedeu desde os aços-ferramenta para os carbonetos sinterizados e cerâmicos, no sentido de maior dureza e melhor resistência ao desgaste a altas temperaturas, geralmente com algum custo na tenacidade à fratura. As principais etapas da evolução foram, sequencialmente, introdução de WC-Co (carboneto de tungsténio-cobalto) sinterizado (década de 1920), WC-Co sinterizado com TiC para corte de aço (década de 1930), TiC-Ni-Mo sinterizado (década de 1950), revestimentos refratários no WC-Co para corte de aço (década de 1970) (hoje em dia cerca de 70 % dos carbonetos sinterizados usados na indústria são revestidos) e cerâmicos de alto desempenho (década de 1980) [3].

A designação das ferramentas de corte é habitualmente feita usando os materiais que as constituem, sendo atualmente os mais utilizados [4]:

- Aços Rápidos (*High Speed Steel* - HSS);
- Carbonetos Sinterizados (Metal duro);
- Carbonetos Sinterizados Revestidos;
- Cermetos;
- Cerâmicos (à base de óxido de Alumínio - Al_2O_3);

- Nitreto de Boro Cúbico (*Cubic Boron Nitride* - CBN);
- Diamante Policristalino (*Polycrystalline Diamond* - PCD);

As ferramentas de corte são componentes bastante solicitados durante a sua utilização e, portanto, é de extrema importância que estas apresentem propriedades adequadas. Embora existam diversas áreas de aplicação das ferramentas de corte (maquinagem de metais, pedra, compósitos, etc.) existem propriedades/características que são geralmente necessárias, tais como dureza a quente e a frio, resistência ao desgaste, elevada tenacidade, resistência ao choque térmico, baixo coeficiente de atrito, elevada condutividade térmica, baixo coeficiente de dilatação térmica, elevado calor específico, conservação da aresta cortante e ser quimicamente inerte. Na Figura 2 pode observar-se a variação da dureza com a temperatura para alguns materiais utilizados em ferramentas de corte.

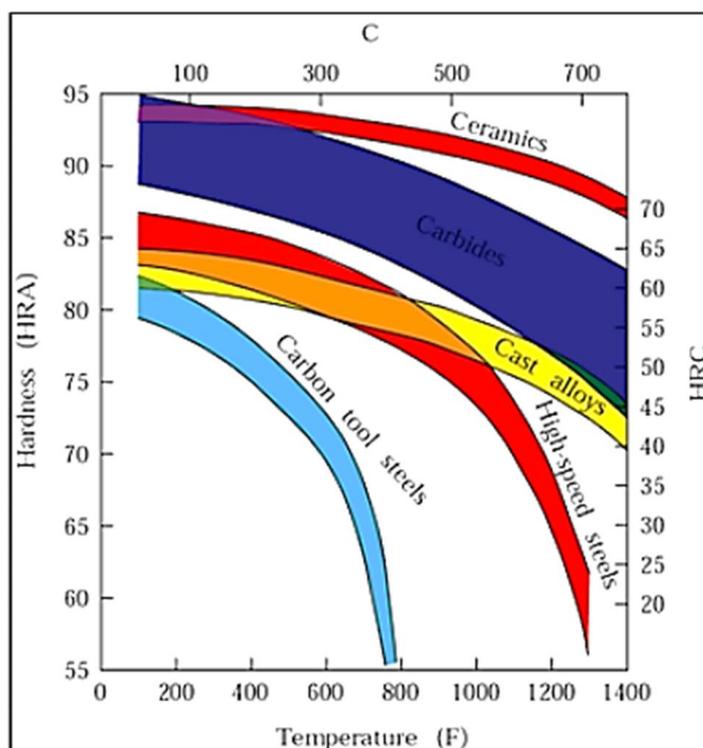


Figura 2: Variação da dureza com a temperatura para alguns materiais utilizados em ferramentas de corte [8]

A Maquinagem é uma tecnologia de corte por arranque da peça que visa a alteração da forma inicial de uma peça, sendo a remoção de material conseguida pelo movimento relativo da aresta cortante (ferramenta de corte) em relação à peça. A maquinabilidade é definida como a aptidão que o material apresenta para ser maquinado [4,8]. A ligação entre os vários parâmetros e a maquinabilidade encontram-se esquematizados na Figura 3.

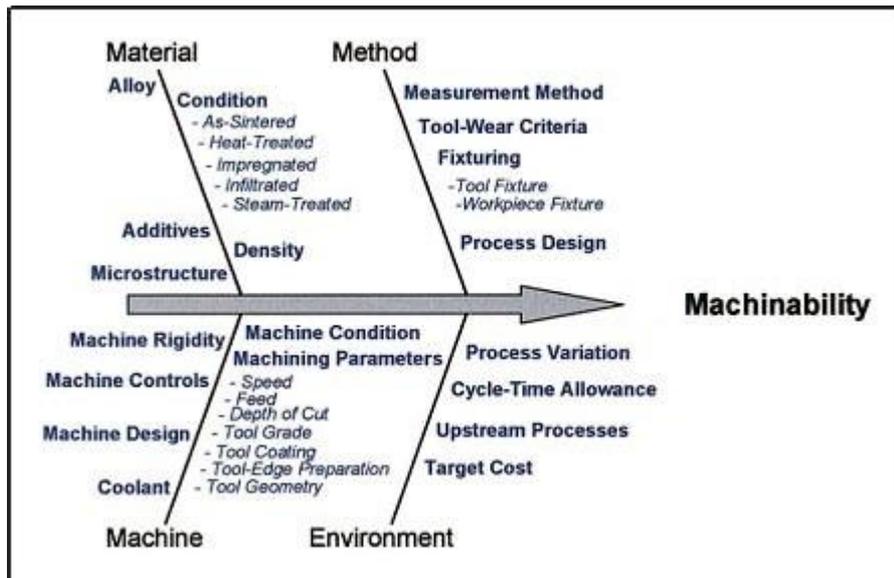


Figura 3: Vários parâmetros dos processos de maquinagem que influenciam a maquinabilidade (adaptado de [4])

As ferramentas de corte são escolhidas essencialmente tendo em conta as propriedades do material a maquinar. Devem, no entanto, considerar também o tipo de operação a realizar, geometria da peça, estado de acabamento exigido, estabilidade de corte e máquina que será utilizada.

O torneamento é a técnica de maquinagem mais utilizada atualmente. Esta técnica é utilizada para produzir peças com superfícies cilíndricas, planas e cônicas, sendo obtidas através de uma ferramenta de corte com uma única aresta de corte. No torno, a ferramenta de corte encontra-se fixa e a peça em rotação. O corte ocorre quando a ferramenta de corte avança no sentido linear com movimento axial, ao longo do eixo da peça, e/ou radial, na direção ao centro da peça [8,9]. Na Figura 4 pode observar-se um esquema exemplificativo dos movimentos presentes numa operação de torneamento.

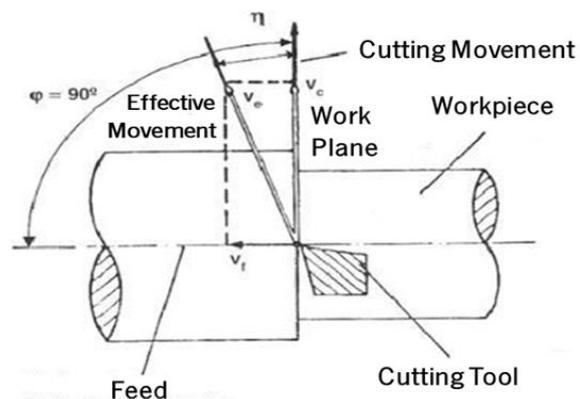


Figura 4: Esquema exemplificativo dos movimentos presentes no torneamento (adaptado de [9])

As geometrias das pastilhas para torneamento podem ser divididas em vários tipos e as mesmas são otimizadas desde o desbaste até ao acabamento. Na Figura 5 pode observar-se um

exemplo de diferentes pastilhas de corte, fabricadas pela empresa Palbit S.A. utilizadas durante o processo de torneamento.



Figura 5: Exemplo de diferentes geometrias de pastilhas de corte para acabamento, semi-desbaste e desbaste (adaptado de [7])

O diagrama da Figura 6 apresenta a zona de trabalho para cada geometria, baseada na forma de quebra da apara, em relação ao avanço e profundidade de corte.

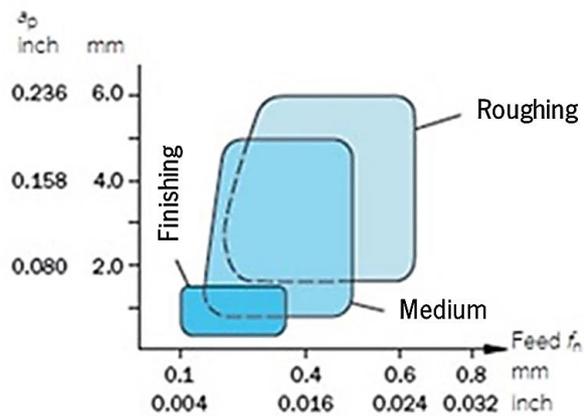


Figura 6: Diagrama correspondente à zona de trabalho de cada pastilha (adaptado de [8])

Relativamente à fresagem, este é também um processo de maquinagem bastante utilizado. Esta técnica consiste em remover material circularmente com uma ferramenta de fresagem específica de modo a obter superfícies maquinadas. A ferramenta utilizada neste processo é de aresta múltipla (o que permite uma melhor conservação da ferramenta de corte através do seu arrefecimento enquanto a aresta não efetua nenhum corte) e designa-se por fresa, e a máquina que realiza esta operação é a fresadora [8,10]. Na Figura 7 pode observar-se um esquema exemplificativo dos movimentos presentes numa operação de fresagem.

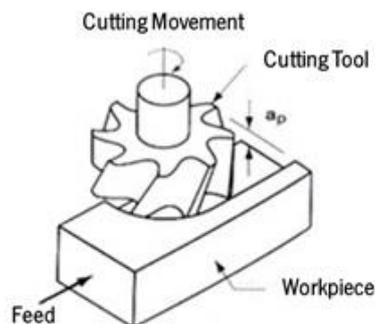


Figura 7: Esquema exemplificativo dos movimentos presentes numa operação de fresagem [10]

2.1.2. Mercado das Ferramentas de Corte

O mercado das ferramentas de corte encontra-se claramente em expansão, tal como pode ser observado na Figura 8. O consumo aumenta a cada ano, sinal claro da evolução desta indústria, assim como da evolução da economia.

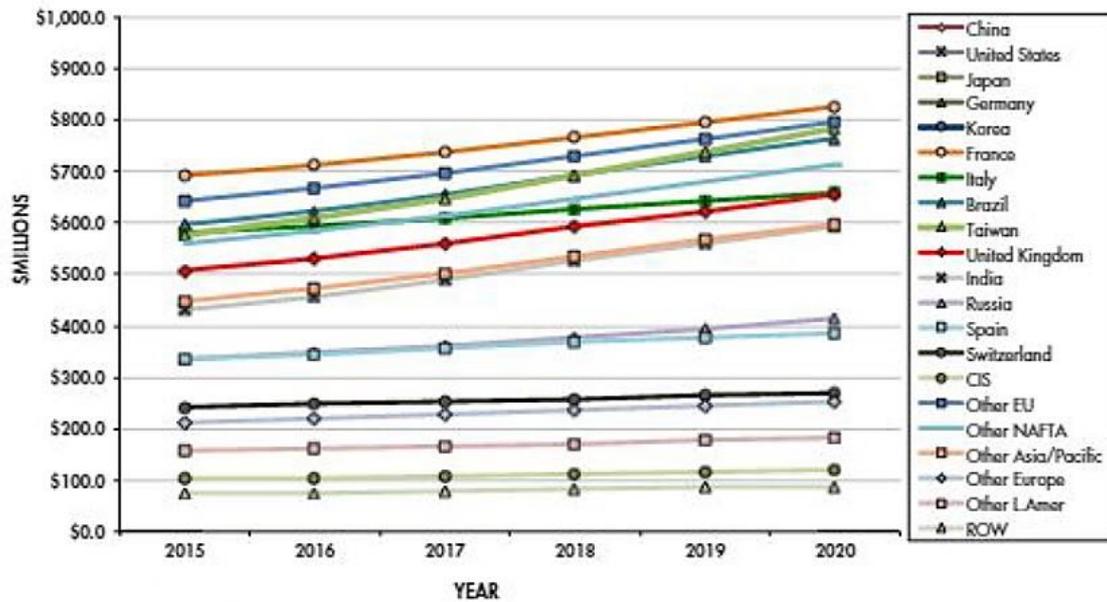


Figura 8: Consumo global de ferramentas de corte por país [11]

Segundo alguns dados de 2015 [11] o consumo de carbonetos sinterizados atingiu 52,3 % do consumo total global de ferramentas de corte, seguido dos aços rápidos com um consumo de 19,5 % e dos cerâmicos (8,4 %), tal como se pode observar pela Figura 9.

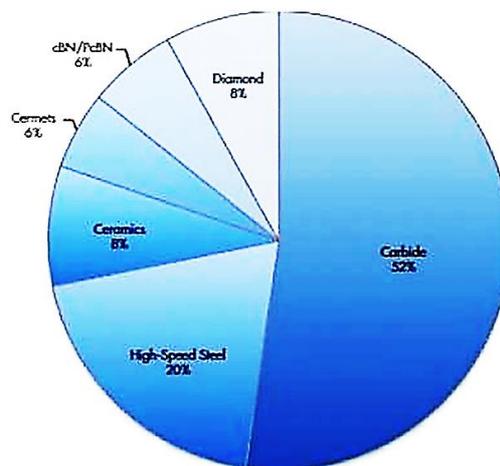


Figura 9: Consumo global de ferramentas de corte por tipo de material em 2015 [11]

Além disso, de acordo com a European Powder Metallurgy Association (EPMA) em 2015, a maior parte (31%) do valor obtido pelas indústrias europeias de metalurgia dos pós (num total de 10,4 mil milhões de euros) foi gerada pelas indústrias dos materiais duros, tornando-os os mais rentáveis entre as indústrias de metalurgia dos pós europeias [12].

2.2. Ferramentas de corte convencionais

Atualmente, os carbonetos sinterizados são os materiais para ferramentas de corte mais utilizados à escala mundial ultrapassando o consumo dos aços rápidos, devido à possibilidade de combinações da sua composição química obtendo-se propriedades desejadas como dureza, resistência ao desgaste e tenacidade.

Os carbonetos sinterizados são compósitos que combinam dois ou mais materiais incorporados num só produto, sendo possível distinguir os seus constituintes. De facto, a escolha de materiais compósitos para o fabrico de ferramentas de corte é bastante frequente. O compósito deve apresentar melhores características relativamente a cada um dos componentes que o constitui, isto é, as propriedades do compósito são dadas pela combinação da matriz com a adição do reforço com o objetivo de melhorar as suas propriedades.

Os carbonetos sinterizados podem ter como material de base carbonetos de tungsténio, de vanádio, de nióbio, de crómio, de tântalo e de titânio. A percentagem de utilização de outros materiais é reduzida, no entanto, materiais duros como os cerâmicos, em determinadas aplicações, também podem ser utilizados [4]. Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades de alguns materiais utilizados no fabrico de ferramentas de corte.

Tabela 1: Propriedades de alguns materiais utilizados para ferramentas de corte [4]

Material	Dureza (HV 10/30)	Tensão Rotura Transversal (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente Dilatação Térmica ($\times 10^{-6}$)	Condutividade Térmica (W/m.K)
Aços rápidos	700 - 900	2500 - 4000	2,6 - 3	9 - 12	15 - 48
Carbonetos	1200 - 1800	1300 - 3200	4,7 - 6,5	4,6 - 7,5	20 - 80
Si ₃ N ₄	1350 - 1600	600 - 900	2,8 - 3,2	3 - 3,3	20 - 35
Al ₂ O ₃	1450 - 2100	400 - 800	3 - 4,5	5,5 - 8	10 - 38
CBN	3500 - 4000	500 - 800	6,8	4,9	100
PCD	5000 - 6000	600 - 1100	8,4	1,5	550

No entanto, os carbonetos sinterizados têm uma dureza a quente limitada e por isso, a sua velocidade máxima de corte é relativamente baixa. Isto motivou o desenvolvimento de revestimentos duros para ferramentas de corte, que são filmes finos de uma camada a várias camadas (tipicamente na ordem dos 2 – 10 μm) e foi demonstrado que aumentam a vida útil da ferramenta de corte em até 10 vezes ao diminuir o seu desgaste. Este aumento na vida útil da ferramenta permite trocas de ferramenta menos frequentes, aumentando, portanto, os tamanhos de lote que podem ser fabricados e, por sua vez, não apenas reduzindo o custo de fabricação, mas também reduzindo o tempo e o custo de configuração. Estima-se que atualmente, 70% dos carbonetos sinterizados usados na indústria sejam revestido [2,13]. Na Figura 10 pode observar-se alguns dos revestimentos habitualmente utilizados nos carbonetos sinterizados.

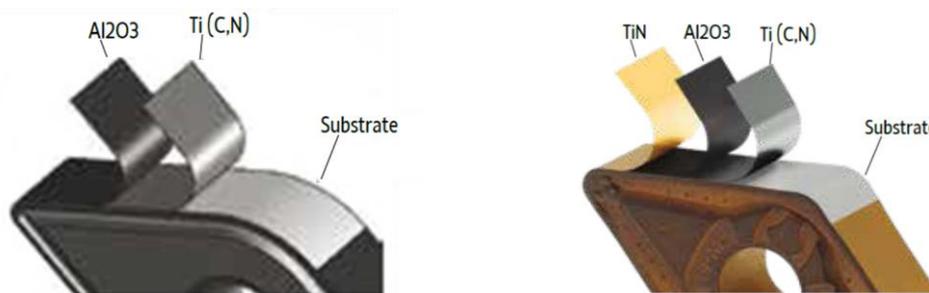


Figura 10: Exemplos de revestimentos utilizados em ferramentas de corte [7]

O segundo grupo de ferramentas com maior expressão são os aços rápidos, que tiveram a sua origem nos trabalhos de investigação desenvolvidos por Taylor e White [15]. Os aços rápidos permitem obter ferramentas de corte com um bom compromisso entre duas propriedades extremamente relevantes para esta aplicação, a dureza e a tenacidade [16].

2.2.1. Carbonetos Sinterizados (Metal Duro)

Os carbonetos sinterizados (metal duro) são um composto de grande importância devido às suas propriedades, que aliam uma elevada dureza e resistência ao desgaste à boa tenacidade. O metal duro é composto por fases diferentes: a fase frágil e dura (carboneto) e a fase ligante (metal dúctil). As partículas de carboneto são responsáveis pela elevada dureza, resistência mecânica e ao desgaste. O metal, mais dúctil tem como função servir de ligante, permitindo a obtenção de materiais com propriedades mecânicas superiores (tenacidade e resistência) e favorecendo a densificação do composto. O ligante deve envolver o carboneto durante a sinterização em fase líquida, ter solubilidade

limitada, formar uma fase líquida a temperaturas não muito elevadas, apresentar um comportamento dúctil e evitar a formação de grafite e da fase eta ($\text{CO}_3\text{W}_3\text{C}$) [17,18].

Como metal duro, o WC-Co é o mais utilizado, devido à sua combinação ideal de elevada dureza, resistência ao desgaste superior e boa tenacidade, o que o torna ideal para aplicações de desgaste e arranque de aparas. Atualmente, na indústria o ligante mais utilizado é o cobalto (Co), devido a formar uma fase líquida a 1275 °C, cuja temperatura de fusão diminui com a dissolução progressiva de carbonetos, dissolvendo até 10 % de WC. Por outro lado, o WC não dissolve cobalto, o que faz com que apenas seja necessário utilizar uma pequena quantidade de ligante. Outros elementos como o níquel, o ferro e outras ligas metálicas [18–20] podem também ser utilizados como ligante. Na Figura 11 a), b) e c) pode observar-se o efeito do teor de cobalto e do tamanho médio de grão na dureza, resistência ao desgaste e tenacidade à fratura, respetivamente.

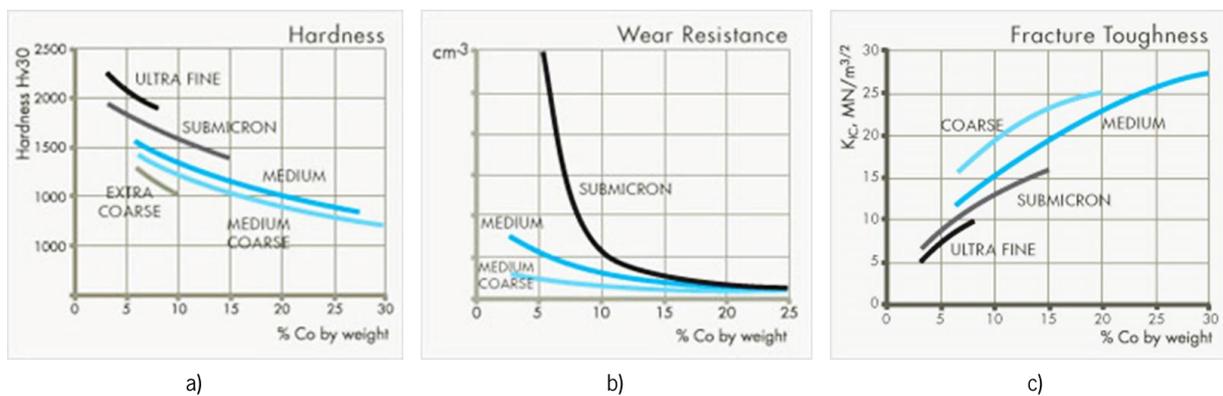


Figura 11: Efeito do teor de cobalto e do tamanho médio de grão de WC na: a) Dureza; b) Resistência ao desgaste; c) Tenacidade à fratura [21]

A tenacidade à fratura consiste numa medida da resistência à propagação de fissuras no material que conduziriam à sua fratura. Pode considerar-se uma medida da deformação plástica que o material consegue acomodar sem fraturar. Para cada material existe uma dimensão crítica para a qual uma fissura se propaga catastróficamente. Quanto maior for esta dimensão crítica, maior a tenacidade à fratura do material. O metal duro é considerado um material frágil por praticamente não sofrer deformação plástica antes da fratura [22,23].

As propriedades físicas destes compósitos dependem das suas características microestruturais, como tamanho e forma de grão e fração volumétrica da fase dura. A sua dureza é cerca de 2100 HV, dependendo do teor de ligante e granulometria do carboneto de tungsténio [20,24]. As propriedades mecânicas do metal duro dependem da microestrutura do material após a sinterização, que por sua vez é influenciada pelas características dos pós: WC e Co. A quantidade de cobalto está

diretamente relacionada com as propriedades do metal duro, ou seja, quando a quantidade de cobalto é aumentada a dureza do material diminui, mas a resistência à fratura aumenta [17,18]. A percentagem de carbono também afeta as propriedades do metal duro levando à formação de grafite, no caso de um excesso de carbono, enquanto que um déficit na percentagem de carbono leva à formação da fase- η (CO_4W_2C), que é uma fase frágil. A percentagem de carbono também influencia a solubilidade do tungstênio no ligante, em ligas ricas em carbono o ligante dissolve até 4 % em massa, enquanto que em ligas pobres em carbono dissolve até 16 % em massa [3]. O aumento da dureza sem comprometer a tenacidade e a elevada resistência ao desgaste são as principais propriedades alvo na fabricação de ferramentas de corte utilizando este material.

Os processos utilizados pela indústria para a produção de metal duro contemplam técnicas de metalurgia dos pós e densificação por sinterização em fase líquida, a uma temperatura entre 1300 - 1500 °C, dependendo da quantidade de cobalto [3,17]. Outras técnicas como moldação por injeção de pós e extrusão também podem ser utilizadas em algumas aplicações [18]. A Figura 12 a) e b) mostra um diagrama de fases pseudo-binário do WC-Co, este sistema tem uma reação eutética ternária a 1275 °C, onde o cobalto é fundido e difunde entre os grãos de carboneto de tungstênio e a contração em função da temperatura para WC-6%Co, respetivamente.

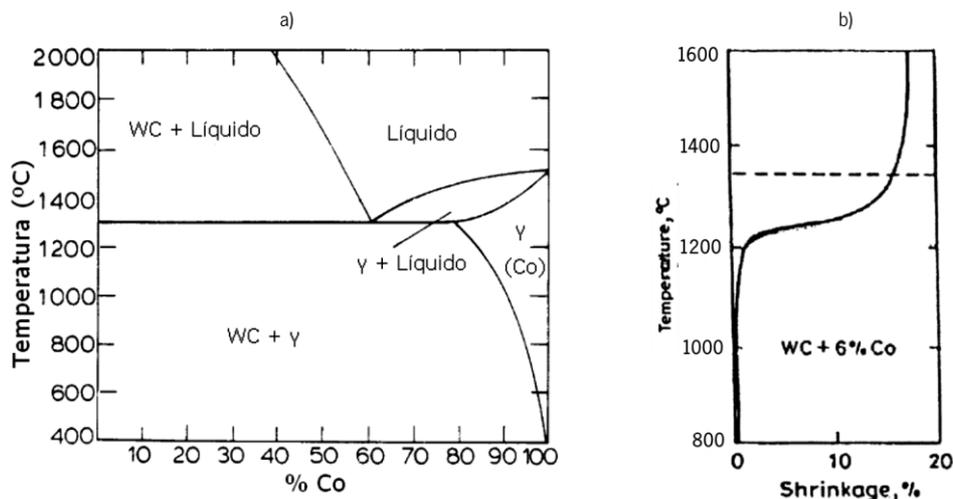


Figura 12: a) Diagrama pseudo-binário do WC-Co [17]; b) Contração vs temperatura para WC-6% Co [25]

A característica distintiva do sistema WC-Co é a elevada densidade obtida na etapa inicial de sinterização, ocorrendo uma contração significativa do metal duro antes da formação da fase líquida. Segundo Upadhyaya [25] as partículas de WC tendem a alinhar as suas faces facetadas de forma a contribuir para a densificação do metal duro. Na fase intermédia de sinterização, a densificação ocorre pela acomodação dos grãos (facilitada pela dissolução de grãos pequenos) e coalescência. Na maioria

das classes comerciais de metal duro a densificação completa atinge-se nesta etapa e corresponde a uma contração linear de cerca de 20% da peça em verde. Na fase final de sinterização não ocorre densificação adicional, os poros eventualmente presentes resultam de gás presente no interior do material. Nesta última etapa, ocorrem apenas alterações microestruturais, nomeadamente modificações do tamanho, distribuição e morfologia dos grãos de WC e a distribuição do ligante [17,25,26].

A microestrutura típica do WC-Co consiste numa distribuição homogênea de partículas de carboneto com formas angulosas e irregulares numa matriz de cobalto [27]. Um exemplo desta microestrutura é apresentado na Figura 13, onde os carbonetos se observam em tonalidades de cinzento claro e o cobalto se observa a cinzento mais escuro.

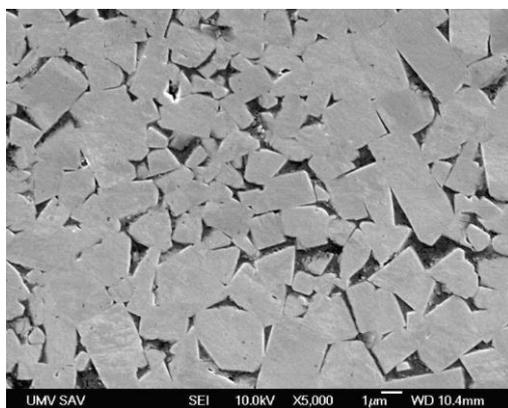


Figura 13: Microestrutura típica do WC-Co [28]

O tamanho médio de partículas de WC varia tipicamente entre 0,5 e 8 μm . Como, em geral, o WC utilizado é monocristalino pode usar-se a designação “tamanho médio de grão de WC”. Assim, numa forma geral, as partículas de WC classificam-se como [27,29]:

- Grão fino: < 1,3 μm ;
- Grão médio: 1,3 a 4 μm ;
- Grão grosseiro: > 4 μm ;

Como já referido anteriormente, a maioria das ferramentas de corte de metal duro utilizadas atualmente usam revestimentos duros. A alta dureza, a resistência ao desgaste e a estabilidade química desses revestimentos oferecem benefícios comprovados em termos de vida útil da ferramenta e desempenho de maquinagem [30]. Uma das técnicas utilizadas é a deposição química em fase de vapor (CVD) que deposita filmes finos nas ferramentas de corte através de várias reações químicas. Outra técnica é o PVD (deposição física em fase de vapor). Este método deposita filmes finos nas ferramentas de corte através de técnicas físicas, principalmente sputtering, evaporação, arco catódico e

HIPIMs. A razão pela qual o PVD tem-se tornando cada vez mais utilizado em relação ao CVD é o facto de que o processo de revestimento ocorre a temperaturas muito mais baixas (400 – 600 °C). A alta temperatura durante o processo CVD (700 – 1050 °C) causa deformação e amolecimento de muitos substratos de ferramentas de corte, em especial dos aços rápidos (HSS). Os revestimentos mais utilizados são: TiN, TiCN, Al_2O_3 , TiAlN, Si, PCD... [2,4,14,30]. Na Figura 14 encontra-se um gráfico comparativo entre a vida da ferramenta de corte e a velocidade de corte para ferramentas sem revestimento e para alguns revestimentos produzidos por PVD.

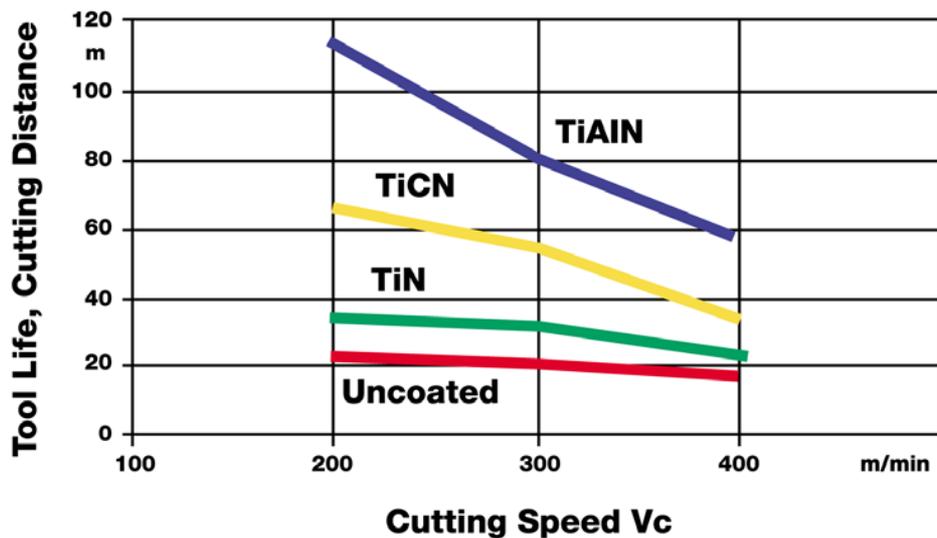


Figura 14: Vida da ferramenta de corte vs velocidade de corte para vários revestimentos produzidos por PVD [2]

Devido à grande variedade de ferramentas de carbonetos sinterizados para diferentes aplicações, foi criado um sistema de classificação (sistema ISO) que as divide em três grupos diferentes (P, M e K). Na Figura 15 pode observar-se este sistema, bem como a composição e algumas propriedades. O grupo P abrange principalmente a maquinagem de materiais ferrosos de apara longa (aços com e sem elementos de liga e as fundições dúcteis); o grupo M, abrange a maquinagem de materiais mais difíceis como aços inoxidáveis austeníticos, aços refratários, aços com manganês, etc; enquanto o grupo K compreende a maquinagem de materiais de apara curta como os ferros fundidos [2,24]. Este grupo foi na última década subdividido em 3 novos grupos: N (materiais não ferrosos), S (ligas resistentes ao calor) e H (aços endurecidos) [4,8].

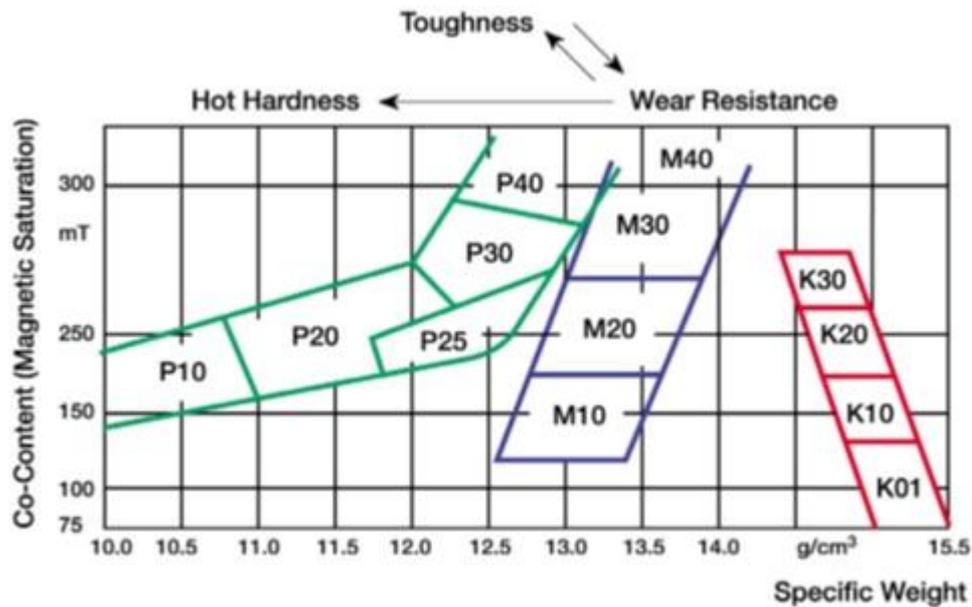


Figura 15: Sistema ISO (composição e propriedades) [2]

2.3. Falhas em Ferramentas de Corte

A maquinação ainda não é um processo completamente compreendido devido à interação complexa entre deformação e temperatura. O processo de deformação é altamente concentrado numa zona muito pequena e as elevadas temperaturas geradas nas zonas de deformação afetam tanto a ferramenta de corte como a peça. As altas temperaturas de corte influenciam fortemente o desgaste e a vida útil da ferramenta, a integridade da superfície da peça e o mecanismo de formação da apana [31,32].

As principais regiões onde o calor é gerado durante o corte ortogonal estão demonstradas na Figura 16. Primeiramente, o calor é gerado na zona de deformação primária devido à deformação plástica. O aquecimento local resulta em elevadas temperaturas, que amolecem o material permitindo maior deformação. De seguida, o calor é gerado na zona de deformação secundária devido a fenômenos de contacto (atrito) entre a apana e a ferramenta de corte. Por fim, na zona de deformação terciária o calor é gerado devido ao trabalho realizado para ultrapassar o atrito. O calor gerado e a temperatura nas zonas primária e secundária são altamente dependentes das condições de corte [31,33].

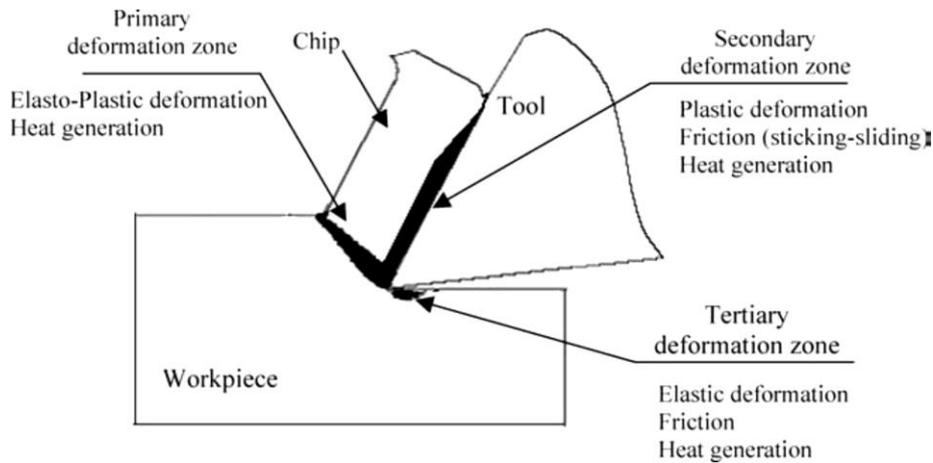


Figura 16: Fontes de calor no corte ortogonal [31]

As forças de corte, estado de tensão, afinidade química e a elevada temperatura conduzem a efeitos indesejáveis na maquinagem. A preponderância do tipo de desgaste e consequente efeito no tempo de vida da ferramenta depende, entre outros parâmetros, do material da ferramenta, peça, condições de corte, utilização correta do lubrificante e estabilidade geral do processo [8,25,27]. Como se pode observar na Figura 17, três dos principais parâmetros de maquinagem (velocidade, avanço e profundidade de corte), têm um efeito distinto na vida útil da ferramenta de corte.

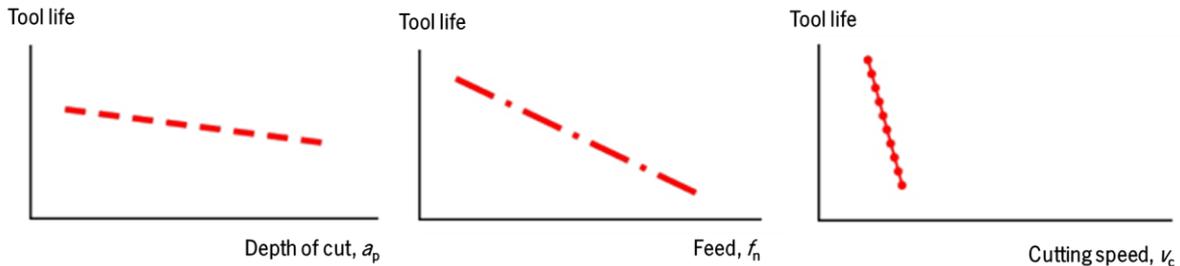


Figura 17: Efeitos das condições de corte na vida útil da ferramenta de corte [8]

Uma vez que o desgaste em ferramentas de corte envolve mecanismos de desgaste complexos, investigadores têm tentado relacionar diretamente a vida útil da ferramenta com os parâmetros de maquinagem (velocidade de corte, avanço, etc.). A equação base de Taylor permite calcular a vida útil da ferramenta em função dos parâmetros de maquinagem e algumas constantes que precisam de ser determinadas experimentalmente ("C" e "n") [34].

$$C = V T^n \quad (\text{Equação 1})$$

C: constante de maquinagem;

V: velocidade de corte (m/minuto);

T: vida da ferramenta (minutos);

n: depende do material da ferramenta;

Na Figura 18 pode observar-se curvas de vida útil em função da velocidade de corte para diferentes materiais de ferramentas de corte.

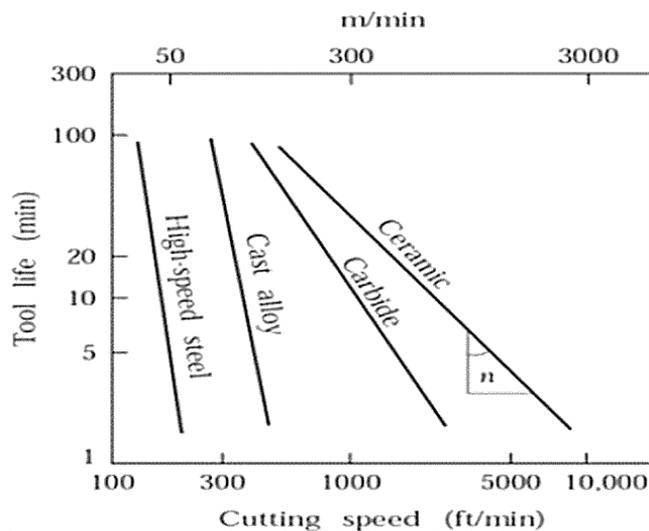


Figura 18: Curvas de vida útil da ferramenta para diferentes materiais [35]

As falhas são o resultado da interação entre a ferramenta e o material a maquinar e das condições de trabalho e resulta da ação de vários fatores [14]:

- Mecânicos;
- Térmicos;
- Químicos;
- Abrasivos;
- Adesivos;

A variação das condições de corte promove uma modificação do estado de tensão e do gradiente de temperatura, alterando deste modo os mecanismos de desgaste. A análise do desgaste da ferramenta é muito importante para a otimização do processo de corte [33].

A utilização de ferramentas adequadas, parâmetros de corte corretos e estabilidade geral do processo são os ingredientes necessários para um desenvolvimento ideal do desgaste. Os diferentes tipos de desgaste, são os seguintes [4,14,32]:

- Deformação plástica;
- Desgaste na face de ataque (*Crater wear*);
- Desgaste da face de saída (*Flank wear*);
- Desgaste em V (entalhe) (*Notch Wear*);
- Aresta postiça de corte;
- Fratura térmica;
- Fratura por fadiga mecânica;

Deformação Plástica - Ocorre devido à combinação entre as altas temperaturas e as pressões elevadas na aresta de corte. Os fatores que mais influenciam este tipo de desgaste são as altas velocidades de corte, avanços elevados e a dureza do material a maquinar.

No geral, ferramentas com uma dureza a quente mais elevada e revestimentos mais espessos aumentam a resistência à deformação plástica. O raio da ponta e a geometria de corte são fatores importantes na diminuição deste tipo de desgaste.

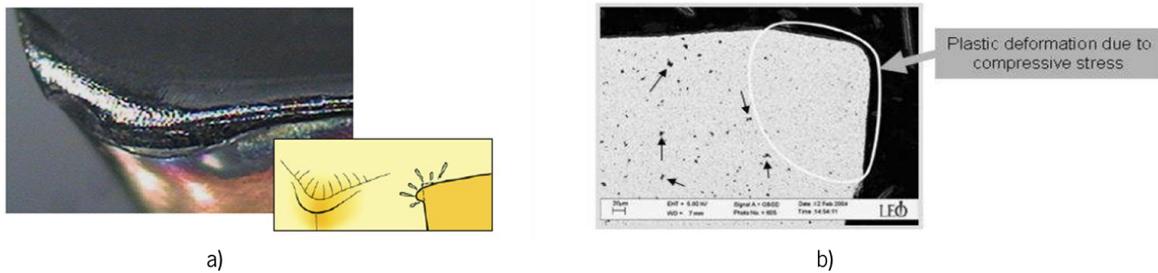


Figura 19: a) Desgaste por deformação plástica [14]; b) Imagem SEM de uma aresta de corte deformada plasticamente [32]

Desgaste na face de ataque (*Crater wear*) - Ocorre na face de ataque da ferramenta onde prevalecem as altas temperaturas e altas pressões através dos mecanismos de abrasão e difusão. A dureza a quente e a fraca afinidade química entre os materiais minimiza a tendência para este tipo de desgaste.

A formação excessiva deste tipo de desgaste altera a geometria da aresta de corte, o que pode comprometer uma boa formação da peça, e enfraquece a aresta de corte podendo levar à fratura.

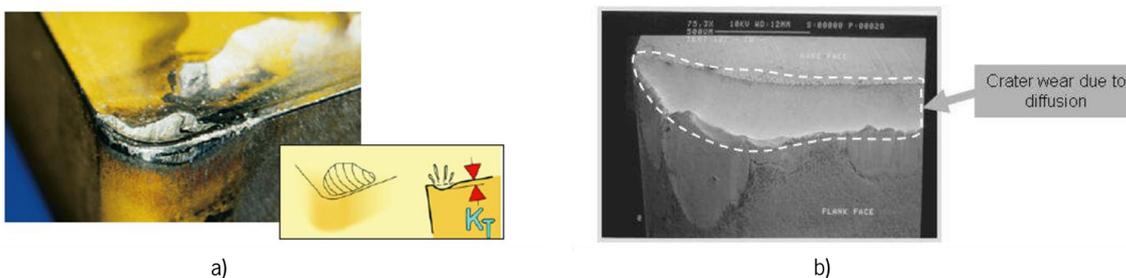


Figura 20: a) Desgaste na face de ataque [14]; b) Imagem SEM do desgaste na face de ataque [32]

Desgaste na face de saída (*Flank Wear*) – Este é o tipo de desgaste mais comum e ocorre na face de saída principalmente devido ao mecanismo de abrasão provocado pelos constituintes duros da peça de trabalho.

O seu desenvolvimento pode ser positivo, uma vez que torna o gume de corte mais afiado no decorrer da maquinação, mas um excessivo desgaste deste tipo provoca um estado superficial pobre.

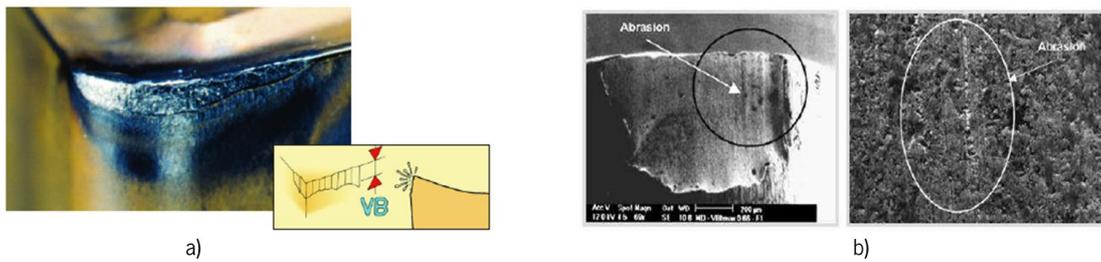


Figura 21: a) Desgaste na face de saída [14]; b) Imagem SEM do desgaste na face de saída [32]

Desgaste em V (entalhe) (*Notch Wear*) – O desgaste em V ocorre principalmente na face de saída e é um caso típico de desgaste por adesão, mas também, pode ser provocada por desgaste por oxidação. Ocorre na maquinagem de materiais com fracas propriedades térmicas como o níquel, titânio, cobalto e aço inoxidável.

Microfissuras sucessivas conduzem à formação do entalhe afetando o estado superficial e integridade da aresta de corte.

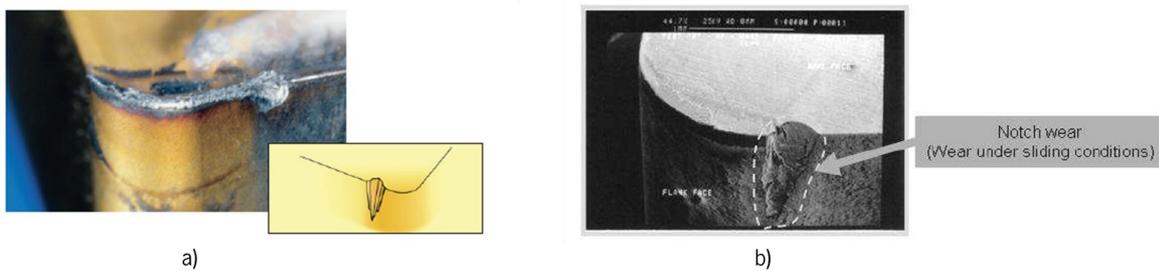


Figura 22: a) Desgaste em V [14]; b) Imagem SEM do desgaste em V [32]

Aresta Postiça de Corte - A formação da aresta postiça de corte ocorre em duas etapas: adesão do material maquinado à face de ataque e crescimento da apara aderente. Esta adesão depende da compatibilidade metalúrgica. A combinação de baixas temperaturas e elevadas pressões são condições ideais para a formação da aresta postiça de corte.

O estado da superfície da peça piora com o aumento da aresta postiça de corte e com a sua progressão existe o risco de quebra da aresta de corte. Para minimizar os efeitos da aresta postiça de corte devemos ter uma boa qualidade superficial da ferramenta e altas velocidades de corte.

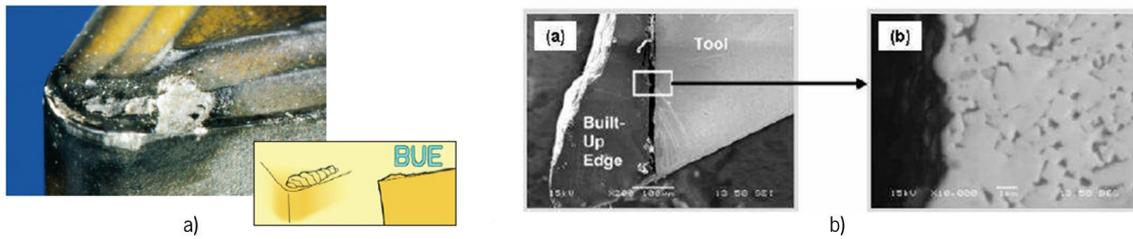


Figura 23: a) Aresta postiça de corte [14]; b) Imagem SEM da aresta postiça de corte [32]

Fratura térmica - Deve-se principalmente a um ciclo de fadiga térmica como consequência de mudanças bruscas da temperatura na zona de corte, fazendo com que apareçam várias fendas perpendiculares à aresta de corte.

Esta situação pode ocorrer em maquinações intermitentes/corte interrompido ou devido a uma refrigeração deficiente.

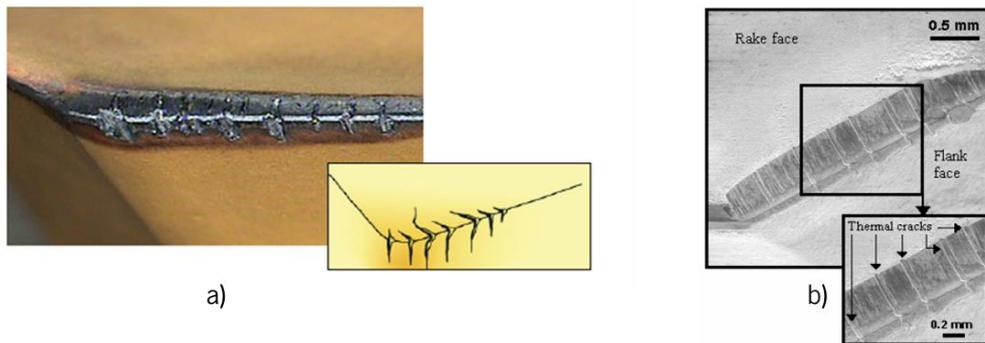


Figura 24: a) Fratura térmica [14]; b) Imagem SEM de fratura térmica [32]

Fratura por fadiga mecânica - A fratura por fadiga mecânica acontece quando as forças de corte e as suas variações são excessivas e cíclicas para a resistência e dureza da aresta de corte provocando fendas paralelas à aresta de corte.

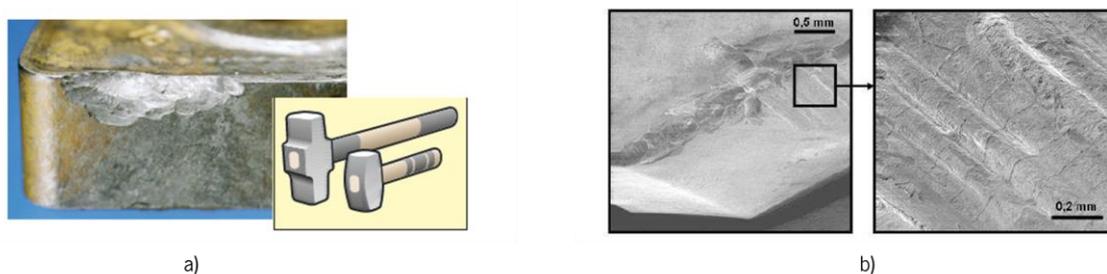


Figura 25: a) Fratura por fadiga mecânica [14]; b) Imagem SEM da fratura por fadiga mecânica [32]

2.4. Metalurgia dos pós

A tecnologia de metalurgia dos pós abrange uma ampla gama de processos, nos quais os componentes são produzidos a partir de pós. Os processos de metalurgia dos pós podem evitar, ou reduzir significativamente, a necessidade de utilizar processos de acabamento (*near net shape process*), o que resulta em custos mais baixos. Este processo permite também um maior controlo sobre o grau, forma e distribuição da porosidade, caso seja necessário [36–38].

Na Figura 26 encontra-se uma comparação entre a utilização (e perdas) de material usando várias tecnologias de manufatura, destacando-se a metalurgia dos pós por uma menor perda de material nos processos de acabamento e uma maior percentagem de utilização das matérias primas.

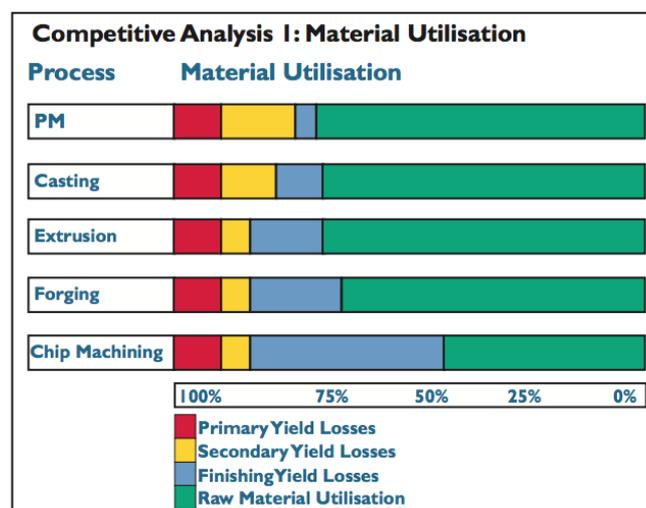


Figura 26: Comparação entre a utilização de material para várias tecnologias de manufatura [38]

Genericamente, as técnicas de metalurgia dos pós consistem na mistura dos pós até se obter uma mistura homogénea, compactação (de forma a obter maior resistência mecânica, onde o material granular vai ocupar uma grande fração de volume) e sinterização para promover as ligações entre os grãos, de forma a eliminar ou diminuir o tamanho dos poros existentes entre eles e deste modo conferir boas propriedades mecânicas ao produto final. Na Figura 27 encontra-se um esquema representativo da técnica de metalurgia dos pós (*press and sintering*).

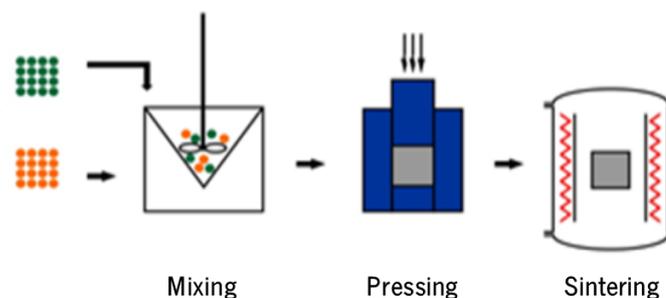


Figura 27: Esquema representativo da técnica de metalurgia dos pós (adaptado de [36])

Mistura e Moagem – Uma das vantagens da metalurgia dos pós é permitir a mistura de composições diferentes com o intuito de formar ligas que dificilmente seriam produzidas por outras tecnologias. Para a produção de metal duro com propriedades macroscópicas isotrópicas é necessário que os pós de partida sejam moídos e misturados permitindo obter uma dispersão homogênea dos carbonetos de tungstênio no cobalto [27,39].

Compactação – A compactação dos pós efetua-se por processos de prensagem e a técnica escolhida depende das dimensões e da complexidade das peças a produzir. Como resultado do processo de compactação obtém-se uma peça que se designa “compacto a verde” com uma densidade inferior à densidade aparente do pó. No caso do metal duro, a densidade aparente do compacto a verde é cerca de 60 % da densidade relativa (teórica). A compactação envolve três estágios, Figura 28, à medida que a pressão aumenta, com o conseqüente aumento de densidade [27].

- 1) Reempacotamento das partículas;
- 2) Deformação nos pontos de contacto;
- 3) Deformação plástica;

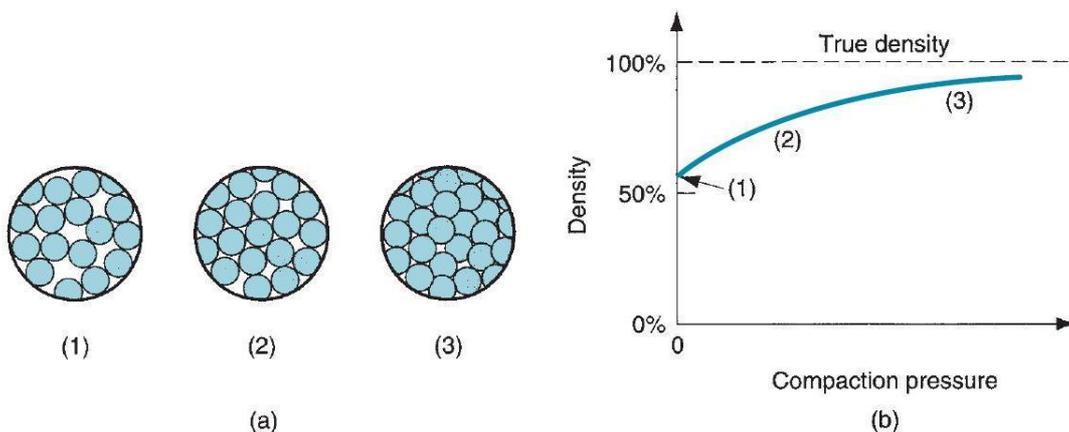


Figura 28: a) Efeito da aplicação da pressão durante a compactação; b) Densidade do compacto em função da pressão aplicada [27]

Sinterização – O processo de sinterização consiste no aquecimento dos compactos a verde em fornos de sinterização, com ou sem aplicação de pressão, para que a peça adquira as suas propriedades mecânicas finais. Peças que contenham furos são colocadas no forno com cilindros de grafite na zona interior dos mesmos, evitando que o material contraia para além do diâmetro do cilindro.

Na sinterização do metal duro utiliza-se o processo SinterHIP, que consiste na aplicação simultânea de pressão e temperatura, levando à produção de um componente com pouca ou mesmo nenhuma porosidade. Este processo encontra-se descrito com mais detalhe no subcapítulo 2.2.1.

Acabamento e Outras Operações – As peças finais podem ser submetidas a pequenas operações de retificação/acabamento. O polimento com abrasivos de diamante é o processo de acabamento mais comum. Outras operações como o corte por eletroerosão podem ser realizadas, se necessário. Para o caso do metal duro, após estas etapas de acabamento, procede-se habitualmente ao revestimento (aplicação de filmes finos) por PVD ou CVD, nas pastilhas de corte.

É comum utilizar-se um ligante de prensagem durante o processo de metalurgia dos pós de modo a aumentar a resistência a verde dos compactos. A remoção do ligante de prensagem adiciona mais uma etapa ao processo de metalurgia dos pós e pode ser feito por decomposição a baixas temperaturas. No caso do fabrico de metal duro o ligante de prensagem mais comum é a parafina, que é removida normalmente a 600 °C em vácuo ou atmosfera de hidrogénio.

A produção de componentes através da metalurgia dos pós apresenta benefícios, mas também desvantagens em diversas áreas chave que se encontram resumidas na lista que se apresenta de seguida [36,37]:

- ✓ Eficiente utilização de material;
- ✓ Elevada precisão dimensional;
- ✓ Bom acabamento superficial;
- ✓ Produção de componentes com formas complexas;
- ✓ Eficiente energeticamente;
- ✓ Elevada eficiência produtiva;
- ✓ Grande variedade de materiais (metais, compósitos, refratários);
- ✓ Produção de componentes com porosidade controlada;

- × Elevado custo de ferramentas (moldes);
- × Limitação de forma (dependente do molde);
- × Limitação de tamanho (dependente do equipamento);

Verifica-se, portanto, que este grupo de tecnologias apresenta um enorme potencial, sendo já bastante utilizada em várias indústrias, como automóvel, aeronáutica, médica, metalomecânica, etc. Na Figura 29 encontra-se um gráfico que estima a produção de componentes por metalurgia dos pós para várias áreas, na Europa, em 2016.

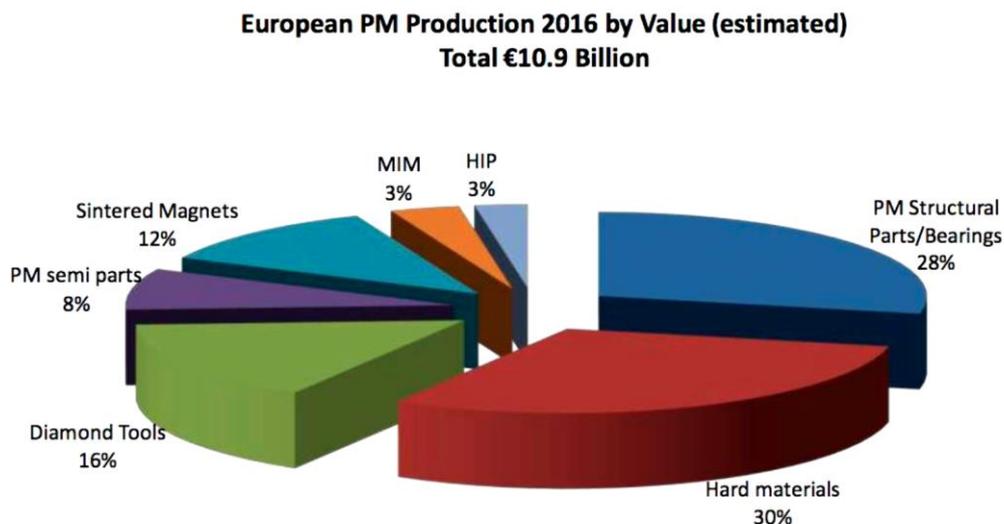


Figura 29: Produção estimada (em mil milhões de euros) de componentes por metalurgia dos pós na Europa em 2016 [38]

Como referido anteriormente, existem vários processos de metalurgia dos pós utilizados pela indústria para a produção de metal duro, como a compactação a verde seguida de sinterização, moldação por injeção de pós e a extrusão. O elevado ponto de fusão do tungsténio (3422 °C) e do carboneto de tungsténio (2800 °C) inviabiliza a utilização de técnicas que têm por base a fusão e por isso a produção de metal duro por metalurgia dos pós é a forma mais económica, eficaz e flexível [36,40].

2.5. Tecnologia Laser

A tecnologia laser emergiu nos últimos anos como uma tecnologia de processamento atrativa com enorme potencial de aplicação numa vasta gama de áreas, sendo considerada uma das maiores inovações do século XX. A palavra laser é um acrónimo para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* e apresenta-se como uma fonte versátil de energia pura numa forma bastante concentrada para o processamento ou tratamento de materiais [41,42].

Hoje em dia, com os avanços da tecnologia, os equipamentos laser são incorporados num sistema computacional, onde é possível introduzir o design pretendido num ficheiro CAD que vai ser reproduzido pelo laser, tal como pode ser observado na Figura 30 [41].

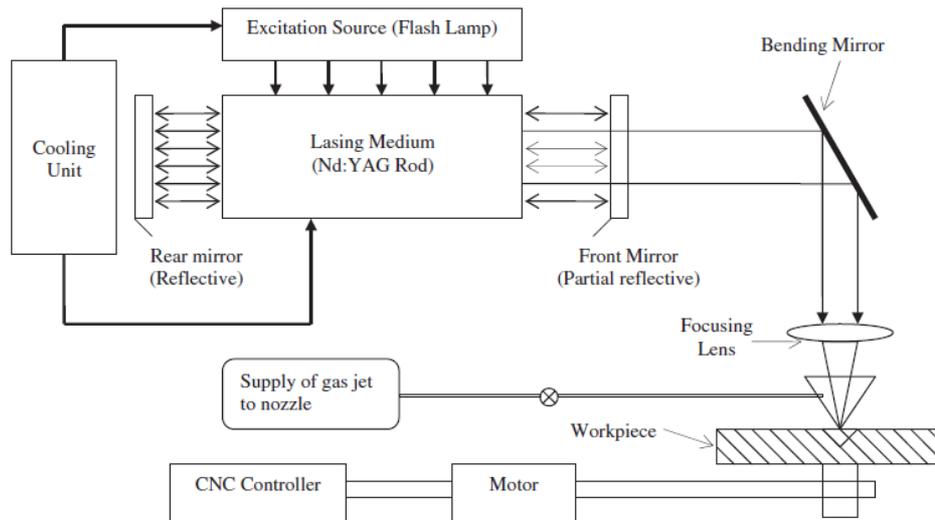


Figura 30: Esquema de um sistema com laser Nd:YAG [35]

A crescente procura da tecnologia laser na maquinagem de materiais pode ser atribuída à ausência dos problemas geralmente associados às tecnologias de maquinagem convencionais como desgaste da ferramenta, quebra da ferramenta de corte, vibração, deflexão e dano no material induzido mecanicamente, pois a maquinagem a laser faz-se na ausência de contacto. Os objetivos da maquinagem a laser são maximizar a taxa de remoção de material, pois não é limitada por restrições, como a força máxima da ferramenta, melhorar a qualidade do produto, aumentar a produtividade, eliminar as operações de acabamento, reduzir os custos de processamento e minimizar a zona termicamente afetada [43,44]. Além disso, a propensão de um material para o desgaste pode ser reduzida alterando a química da superfície, morfologia e estrutura [45].

Vários tipos de laser são usados atualmente em sistemas de processamento a laser, sendo os mais comumente utilizados na maquinagem os lasers CO₂, Nd:YAG e Excimer. O laser CO₂, com comprimento de onda de 10,6 μm, tem uma maior eficiência e menores custos de manutenção e operação, enquanto que o laser Nd:YAG, com comprimento de onda de 1,064 μm, apresenta uma maior absorvância e, é por isso mais usado para metais e cerâmicos. O laser CO₂ é mais utilizado para polímeros e materiais orgânicos [16,46]. Adicionalmente, o feixe laser pode ser contínuo (CW) ou pulsado (PM). Nos lasers contínuos, o feixe é emitido de forma incessante enquanto que nos pulsados há um intervalo de tempo entre pulsos sucessivos [41,46]. Também é importante ter em consideração o tempo de pulso, pois teoricamente quanto mais curto o tempo de pulso maior será a precisão [47]. Os comprimentos de onda típicos dos vários tipos de laser assim como o seu modo de atuação estão listados na Tabela 2.

Tabela 2: Tipos de lasers e suas características [37]

Tipo de Laser		Comprimento de onda (nm)	Características típicas
Sólido	Ruby	694	PM, 5W
	Nd:YAG	1064	PM, CW, 1 – 800 W
	Nd:glass	1064	PM, CW, 2 mW
Semicondutor	GaAs	800 – 900	PM, CW, 2 – 10 mW
Molecular	CO ₂	10600	PM, CW, <15 kW
Iões	Ar	330 – 520	PM, CW, 1 W – 5 kW
	Excimer	200 – 300	PM
Gás Inerte	He-Ne	633	CW, 20 mW

2.5.1. Maquinagem a Laser

Durante o processamento a laser é importante ter em consideração os efeitos que o laser pode provocar no material irradiado, uma vez que as interações laser/material podem ser bastante complexas. Alguns destes efeitos incluem instabilidade na absorção, fusão, evaporação, formação de plasma, entre outros [41,44]. Estes efeitos podem ser observados na Figura 31. A área afetada pelo laser inclui uma área maior do que aquela irradiada pelo laser devido à condução térmica do material [48].

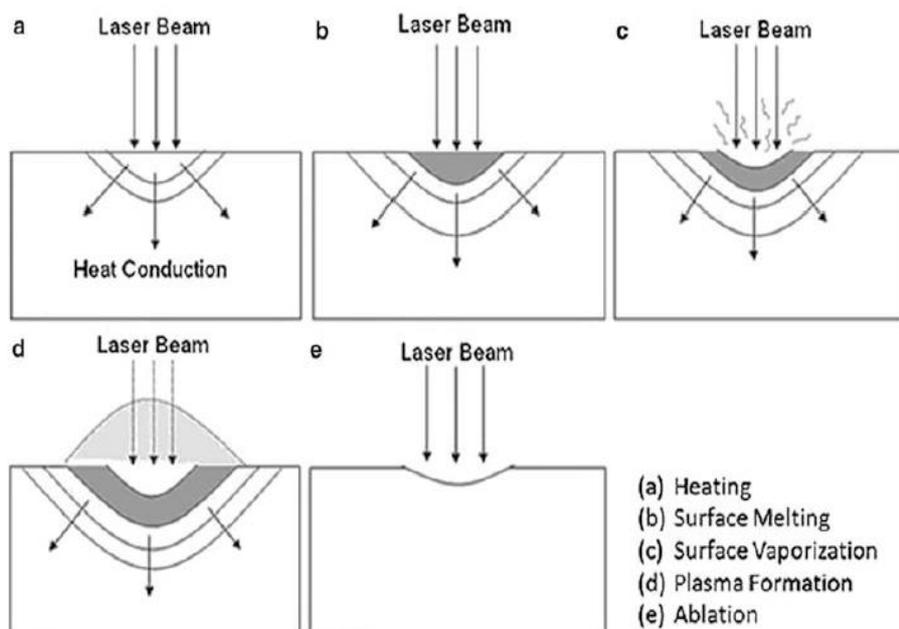


Figura 31: Efeitos da interação do laser com o material [44]

A escolha correta dos parâmetros do laser permite alcançar um controle preciso das propriedades finais do material. Isto faz com que seja possível otimizar o processo de forma a alcançar as propriedades desejadas para uma determinada aplicação [44,45].

A maquiagem a laser refere-se à remoção controlada de material por aquecimento induzido a laser a partir da superfície da peça de trabalho e inclui perfuração, corte, limpeza, marcação, gravação e várias outras formas de remoção assistida a laser. O corte a laser é a aplicação industrial mais comum na maquiagem de materiais a laser. Metais, cerâmicos, polímeros e compósitos podem ser cortados a laser ou perfurados, independentemente da sua dureza [43,44] Na Figura 32 pode observar-se um esquema representativo da maquiagem a laser a uma, duas e três dimensões.

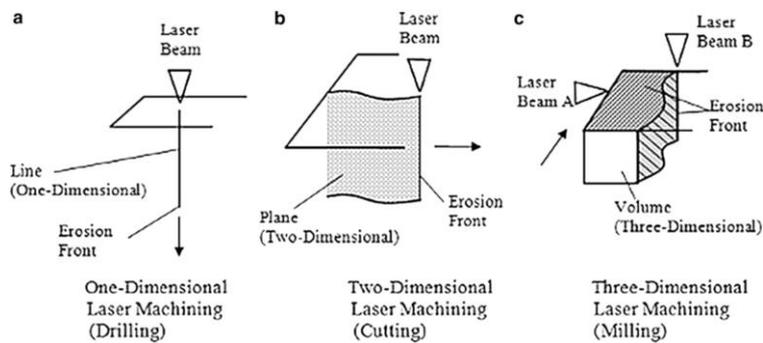


Figura 32: Esquema representativo da maquiagem a laser a uma, duas e três dimensões [44]

Os materiais que exibem um alto grau de fragilidade ou dureza e têm propriedades térmicas favoráveis, como baixa difusividade térmica e condutividade, são particularmente adequados para a maquiagem a laser. Uma vez que, a transferência de energia entre o laser e o material ocorre através de irradiação, nenhuma força de corte é gerada pelo laser, levando à ausência de danos induzidos mecanicamente, desgaste da ferramenta e vibração da máquina [42]. Na Figura 33 encontra-se um esquema representativo da maquiagem a laser a três dimensões.

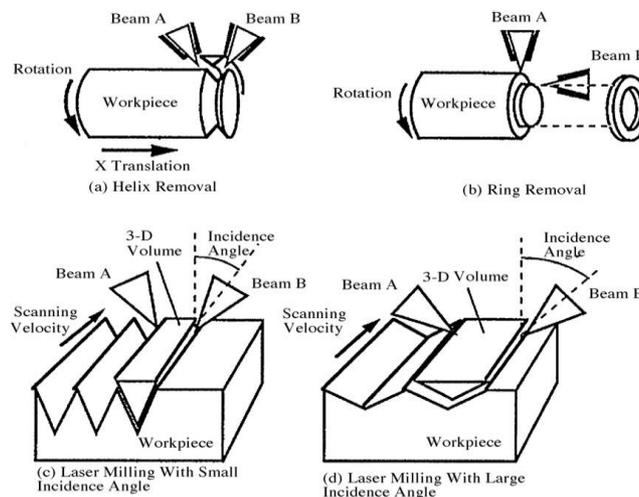


Figura 33: Maquiagem a laser a três dimensões [46]

2.5.2. Maquinagem a Verde

O titânio e as suas ligas, o aço inoxidável, as ligas à base de níquel, os cerâmicos (alumina, carboneto de tungstênio, etc) e os compósitos (fibras de carbono, epoxys, etc) são dos materiais mais difíceis de maquinar através da maquinagem convencional devido às suas excelentes propriedades mecânicas, como a sua dureza, resistência, resistência à corrosão e fadiga [49,50].

Entre os materiais mais difíceis de maquinar está o metal duro (WC-Co), devido à sua elevada dureza, resistência ao desgaste e boa tenacidade. De modo a ultrapassar estas dificuldades no processo de maquinagem convencional e os seus elevados custos associados, várias técnicas de maquinagem não convencional têm sido testadas, particularmente em aplicações onde é necessária uma grande precisão dimensional em peças complexas [51].

Ao contrário da maioria dos metais, materiais com elevado ponto de fusão e baixa condutividade térmica não podem ser fabricados por fundição e a maquinagem destes materiais no estado sinterizado também não é vantajoso devido ao seu elevado custo, elevada dureza e possibilidade de aparecimento de fendas. Assim sendo, o fabrico por metalurgia dos pós seguida de maquinagem a verde é a opção mais viável [50,52]. Na Figura 34 pode observar-se uma imagem SEM de uma microcavidade maquinada a verde em alumina.

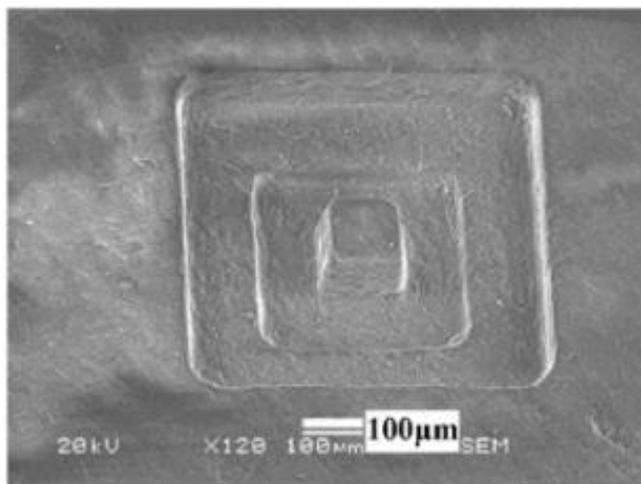


Figura 34: Microcavidade maquinada a verde em alumina [53]

A maquinagem a verde consiste na remoção de material antes da sinterização, ou seja, quando o material ainda é um compacto a verde. A maquinagem a verde através de *Computer Numerical Control* (CNC) é uma forma de fabricação *near net shape* eficiente devido ao seu consumo mínimo de energia e tempo, diminuição do desgaste das ferramentas e aumento da taxa de remoção de material. No entanto, vários aspetos têm de ser tido em conta na maquinagem de materiais a verde, incluindo a maquinabilidade e resistência destes materiais, o fabrico de porta amostras para a

colocação das peças a verde durante a maquinagem e o fabrico de ferramentas de corte que proporcionem bom acabamento superficial [53–55]. Como a resistência a verde deste compactos é geralmente bastante baixa, não conseguindo por isso suportar o processo de maquinagem, um ligante de prensagem é utilizado para aumentar a sua resistência e maquinabilidade [52,56].

A maquinagem a laser é uma técnica avançada de maquinagem usada em várias áreas como eletrónica, aeroespacial e no fabrico de diversos componentes mecânicos (onde se incluem as ferramentas de corte). Esta é uma técnica de maquinagem sem contacto, o que reduz/praticamente elimina o desgaste da ferramenta, vibrações, forças de corte e as limitações de forma. No entanto, devido à dureza elevada e à natureza frágil de alguns materiais, como é o caso do metal duro, a maquinagem a laser destes materiais tende a formar fissuras e a eficiência de maquinagem é baixa. Assim, a maquinagem a laser de compactos a verde tem sido bastante investigada como uma alternativa viável [57].

2.6. Condutividade Térmica em Ferramentas de Corte

A condutividade térmica (k) é uma medida da capacidade de um material conduzir o calor. Nos metais, devido à natureza das ligações metálicas, os eletrões de valência dos átomos, eletrões livres, movem-se livremente e aleatoriamente ao longo do material, transportando energia térmica. Valores típicos de condutividade térmica para os metais variam entre 20 e 400 W/(m °C). Nos não metais, o número de eletrões livres é muito menor e têm mobilidades muito baixas, sendo o transporte de calor realizado maioritariamente pelas vibrações da rede. Valores típicos de condutividade térmica para os cerâmicos variam entre 2 e 50 W/(m °C) enquanto os polímeros apresentam condutividades térmicas das mais baixas conhecidas na ordem de 0,3 W/(m °C) [58,59].

A condutividade térmica é calculada normalmente a partir de medições de difusividade térmica. Por estas duas propriedades variarem de forma muito idêntica, ambas são utilizadas para o estudo do transporte de calor e para aferir a influência de outros parâmetros neste transporte. A conversão entre elas é efetuada recorrendo à seguinte equação: onde a difusividade térmica (α_T) é expressa em função da condutividade térmica (k), da densidade (ρ) e do calor específico do material (C_p) [60].

$$\alpha_T = \frac{k}{\rho C_p} \quad (\text{Equação 2})$$

Durante a maquinagem uma grande quantidade de calor é gerada em função dos parâmetros de corte. A condutividade térmica atua de forma a transferir esse calor para fora da zona de corte. Assim, materiais com condutividade térmica baixa permitem um aumento rápido da temperatura na zona de

corte, resultando num aumento dos mecanismos de desgaste e consequente redução da vida útil da ferramenta de corte, mau acabamento superficial, formação de apara e precisão dimensional [31,61,62]. Na Figura 35 pode observar-se a distribuição típica de temperatura na zona de corte.

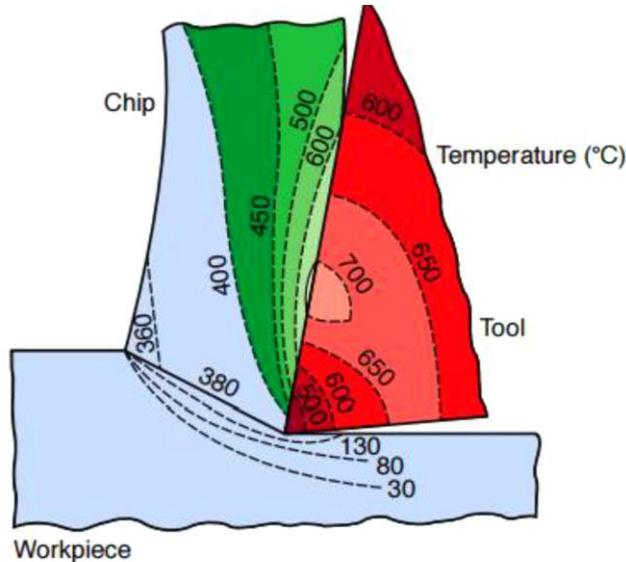


Figura 35: Distribuição típica de temperatura na zona de corte [63]

A condutividade térmica é uma propriedade de extrema importância para o metal duro por a maioria das suas aplicações implicar a exposição do material a temperaturas elevadas. A condutividade térmica é determinante na previsão do comportamento e duração das ferramentas, sendo utilizada para o estudo e determinação das temperaturas máximas de trabalho, dos gradientes de temperatura gerados ao longo da ferramenta e das possíveis tensões térmicas resultantes [64–66]. Na Figura 36 pode observar-se o efeito da variação da temperatura na condutividade térmica do WC-Co, para várias classes e tamanhos de grão.

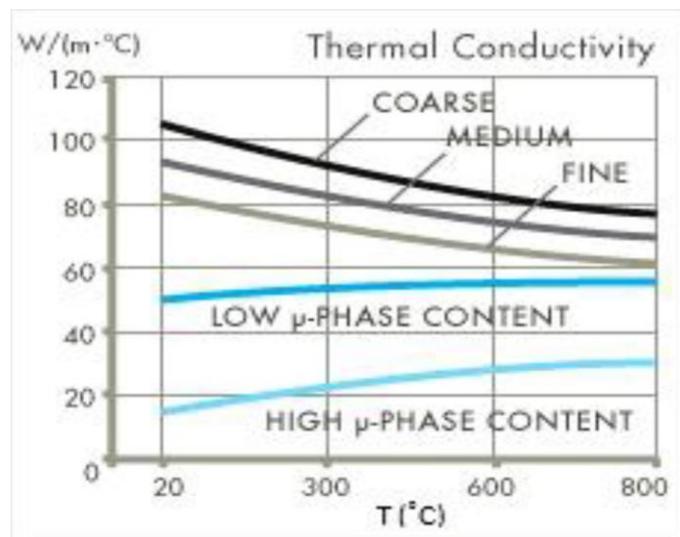


Figura 36: Variação da condutividade térmica do WC-Co em função da temperatura, para várias classes e tamanhos de grão [21]

Os limites de grão são zonas com maior concentração de defeitos do que as fases WC e Co e, conseqüentemente, são zonas que contribuem fortemente para a diminuição da condutividade térmica. Como a área total de limites de grão é inversamente proporcional ao tamanho médio dos grãos de WC, quanto menor for o tamanho médio de grão, maior é a área correspondente aos limites de grão. Conseqüentemente, menores tamanhos de grão resultam num maior número de defeitos a atuar como centros de dispersão dos fonões e dos elétrons e menor é a condutividade térmica. Quanto à influência do cobalto esta ainda não é muito clara, existindo diversos trabalhos na literatura que reportam tendências contrárias [64,66,67].

A condutividade elétrica (σ) pode ser definida como a capacidade de um material conduzir corrente elétrica. A corrente elétrica que atravessa um material resulta do movimento dos portadores de carga. Para a maioria dos materiais sólidos esta corrente resulta dum fluxo de elétrons, mas para sólidos com ligações iônicas, os iões também têm a sua contribuição [58].

Com referido anteriormente, para materiais com condutividade térmica muito elevada, a contribuição dos elétrons é dominante, e por este motivo a condutividade térmica e elétrica relacionam-se de forma aproximada pela equação de Wiedemann-Franz (Equação 3), através de um fator L (número de Lorenz, $2,44 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega/\text{K}^2$), idêntico para todos os metais, que é expresso em função da condutividade térmica (k), da condutividade elétrica (σ) e da temperatura (T).

$$L = \frac{k}{\sigma T} \quad (\text{Equação 3})$$

A variação da condutividade elétrica segue uma tendência semelhante à da condutividade térmica, ou seja, deverá diminuir com a temperatura. Vários autores referem o valor de $20 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ para a resistividade elétrica do WC-Co de classe convencional, à temperatura ambiente [21,29,68]. Na Figura 37 pode observar-se a variação da resistividade elétrica do WC-Co com a temperatura e com o teor em Co.

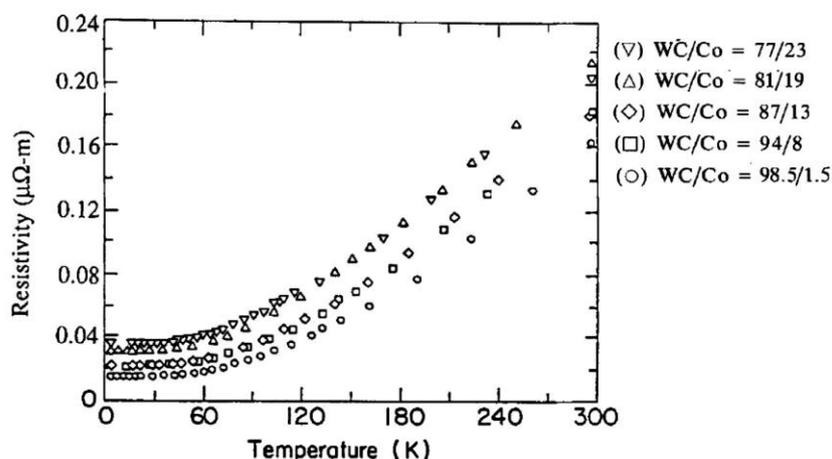


Figura 37: Variação da resistividade elétrica do WC-Co com a temperatura e com o teor em Co [67]

A medição/estimativa da temperatura é um dos processos mais complicados na maquinagem, devido à complexidade do fenómeno e ao ponto de contacto entre a ferramenta e a peça de trabalho (aresta de corte). Consequentemente, o desenvolvimento de um modelo para a medição da temperatura de maneira precisa e exata é um processo extremamente difícil. Devido à falta de dados experimentais suficientes, não é possível realizar um modelo matemático, no entanto, várias tentativas já foram realizadas com o intuito de medir a temperatura em processos de maquinagem [61,62]. Uma das equações mais utilizadas para prever a temperatura na zona de corte é a seguinte [63]:

$$T = \frac{1,2 \gamma_f}{\rho_c \left(\frac{V t_0}{K}\right)^{1/3}} \quad (\text{Equação 4})$$

O principal fator que limita a maquinagem é a velocidade de corte, pois com o aumento da velocidade de corte a temperatura também aumenta, fazendo com que haja um limite para a taxa de remoção de material. Uma das maneiras de baixar a temperatura é a utilização de fluidos de corte, que reduzem o atrito entre a peça e a ferramenta, dissipando assim o calor de forma mais eficiente [33]. Na Figura 38 pode observar-se a evolução da temperatura no torneamento em função da velocidade de corte na face de saída e na interface ferramenta/peça.

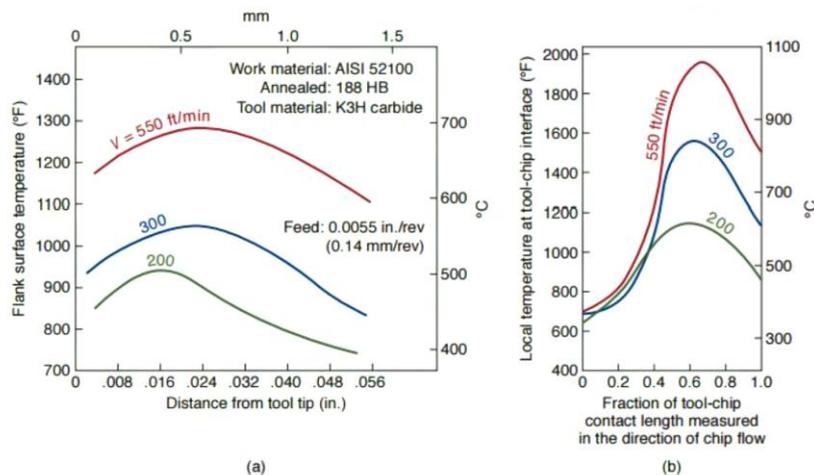


Figura 38: Evolução da temperatura em função da velocidade de corte: a) face de saída; b) interface ferramenta/apara [35]

A adição de materiais condutores pode aumentar a condutividade térmica das ferramentas de corte, o que permitirá aumentar o seu tempo de vida útil.

O cobre é um material vital para a sociedade, sendo fulcral no fornecimento de eletricidade e água, permitindo inovações tecnológicas e um desenvolvimento sustentável. As duas principais propriedades que o tornam indispensável são a sua elevada condutividade elétrica e térmica. No entanto, a combinação única destas e de outras propriedades como a resistência à corrosão e ductilidade tornam-no extremamente versátil para um grande leque de aplicações. Acresce o facto de poder ser facilmente combinado com outros metais formando ligas e de poder ser facilmente utilizado

como liga de brasagem, em soldadura, etc. Além de todas estas propriedades também apresenta propriedades antimicrobianas e pode ser facilmente reciclado sem perda de propriedades. Atualmente cerca de 40 % da procura europeia de cobre é assegurada por cobre reciclado [69]. Na Tabela 3 são apresentadas algumas propriedades deste metal.

Tabela 3: Algumas propriedades do cobre [69]

Símbolo Químico	Cu
Massa Específica	8,96 g/cm ³
Ponto de Fusão	1084 °C
Ponto de Ebulição	2560 °C
Resistividade Elétrica	1,72 μΩ.cm

O cobre tem a maior condutividade térmica dos metais (cerca de 60 vezes melhor que o aço inoxidável [69] e cerca de 1,5 vezes melhor que o alumínio puro [70]), sendo apenas ultrapassado pela prata. Isto, combinado com o seu baixo preço em comparação com a prata fazem com que o cobre seja a escolha número um quando aplicações onde uma rápida transferência de calor é necessária. Na Tabela 4 encontra-se a comparação entre os valores da condutividade térmica e preço dos quatro metais melhores condutores de calor.

Tabela 4: Comparação entre os valores da condutividade térmica e preço de alguns metais

Material	Condutividade Térmica (W m⁻¹ K⁻¹) [70]	Preço (US/Kg) (dados de 24/9/2018)
Alumínio	237	2,03 [71]
Cobre	401	6,32 [71]
Ouro	317	38540 [72]
Prata	429	460 [72]

2.7. Ferramentas de Corte Inteligentes

Com o avanço da tecnologia, novos materiais com elevado ponto de fusão, elevada dureza e baixa condutividade térmica estão, cada vez mais, a ser utilizados nas indústrias modernas, o que leva a que seja necessário a criação de novos processos de fabrico e materiais para ferramentas de corte. Por exemplo, a indústria aeroespacial está na liderança com sua procura aparentemente insaciável por estruturas cada vez mais leves e resistentes com a introdução de materiais compósitos avançados. O novo Boeing Dreamliner, por exemplo, tem mais de 50% em volume do seu material em materiais

compósitos [73]. O novo airbus (A380) tem seções de fuselagem fabricadas em camadas de pré-impregnado contendo painéis de fibra de vidro entre painéis de liga de alumínio.

No entanto, estes materiais criam enormes desafios durante a maquinagem. Quanto mais duro o material, mais difícil é de maquinar. Além disso, a baixa condutividade térmica destes materiais resulta num rápido aumento da temperatura na zona de corte, temperatura essa que tem um papel crítico no processo de maquinagem. Esse aumento de temperatura, aumenta a taxa de desgaste da ferramenta diminuindo assim o tempo de vida útil da ferramenta. Em última análise, também afeta a precisão dimensional, acabamento superficial e integridade da superfície do componente. Devido a estes problemas, a temperatura na zona de corte é uma limitação para aumentar a taxa de remoção de material [74,75].

O uso de fluidos de corte (atuam como lubrificantes e refrigerantes) na maquinagem reduz o atrito entre a peça e a ferramenta, dissipando assim o calor de forma mais eficiente. No entanto, o uso de fluidos de corte é prejudicial não apenas para o ambiente, mas também para a saúde humana. Devido às rigorosas obrigações ambientais, a eliminação desses fluidos de corte tornou-se difícil. Além disso, esses fluidos podem causar doenças de pele e pulmões entre os operadores de máquinas. Por todas estas razões, há uma forte necessidade de mudar para uma manufatura sustentável para ter benefícios financeiros e ambientais [74,76,77].

O desenvolvimento de ferramentas de corte inteligentes tem um enorme potencial e é essencial para uma maquinagem consciente ao nível ambiental e, por isso, tem chamado a atenção como uma das tecnologias de maquinagem da próxima geração, particularmente no contexto da Indústria 4.0 [78]. O conceito de ferramentas de corte inteligentes ainda não se encontra bem definido e padronizado, mas segundo Byrne e Scholta [79] isto pode ser alcançado satisfazendo os três aspetos principais de uma ferramenta de corte ideal: ecologia, tecnologia e economia.

Nos últimos anos, um esforço constante tem sido feito para mover a indústria da utilização desmedida de lubrificantes para a quantidade mínima de lubrificação. A maquinagem convencional usa entre 300 – 4000 L/h de refrigerantes durante a maquinagem, enquanto que considerações ambientais apenas permitem o uso entre 6 – 70 mL/h. Este último modo é designado maquinagem a seco e tem-se tornado cada vez mais popular [2,76,80]. No entanto, a maquinagem a seco envolve elevado atrito e adesão, aumentando assim o calor gerado na aresta de corte, o que reduz a vida útil da ferramenta [81]. Shokrani et al. [82] reportaram que o custo do fluido de corte é de cerca de 16 % do custo total de maquinagem. Contudo, o custo da ferramenta de corte representa apenas 4% do custo de maquinagem. Portanto, é muito mais economicamente eficiente ter uma redução na vida útil

da ferramenta do que manter custos muito maiores associados aos fluidos de corte. Assim, as questões acima mencionadas, como danos para a saúde do operador e eliminação de fluidos de corte e seus custos extras podem ser reduzidas através da adoção de maquinagem a seco.

Para melhorar as aplicações da maquinagem a seco, ferramentas de corte inteligentes têm sido desenvolvidas. Nos últimos anos, o desenvolvimento de revestimentos duros depositados por CVD e PVD foram a grande inovação [16]. Hoje em dia, o desenvolvimento de novos materiais de ferramentas de corte, de revestimentos de lubrificantes sólidos [77], de canais de arrefecimento internos [83,84], de superfícies texturizadas [85], de maquinagem criogénica [82] são algumas das metodologias adotadas para tentar melhorar a performance das ferramentas de corte.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais usados ao longo deste estudo. Apresenta-se também de forma detalhada todo o procedimento usado na produção das amostras. Para além disso, efetua-se também uma pequena revisão bibliográfica relativamente às técnicas de caracterização utilizadas.

3.1. Materiais

3.1.1. Metal Duro

O pó de metal duro utilizado no trabalho experimental desta dissertação foi fornecido pela empresa Palbit S.A. A composição e granulometria do pó são respectivamente WC (0,8 μm) + 10 % Co em peso, com aproximadamente 2 % de parafina.

Através da análise SEM, pode verificar-se que o tamanho dos grânulos varia entre 100 - 150 μm após a etapa de granulação e a sua forma é tendencialmente esférica, como se pode observar na Figura 39.

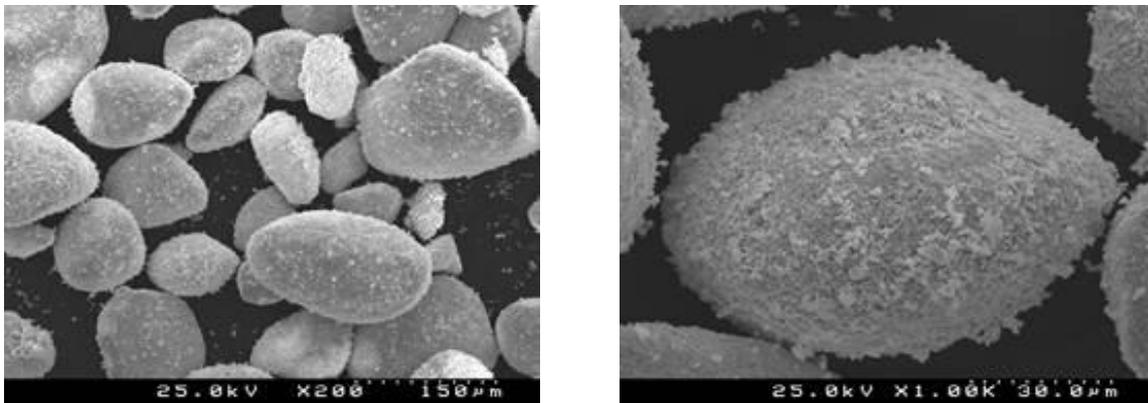


Figura 39: Geometria e tamanho do pó de WC-Co utilizado

O pó utilizado foi analisado em termos de estrutura e fases constituintes por difração de raios-X. Na Figura 40 é apresentado o padrão de raios-X referente ao pó de WC-Co utilizado, onde estão identificados os seus picos característicos.

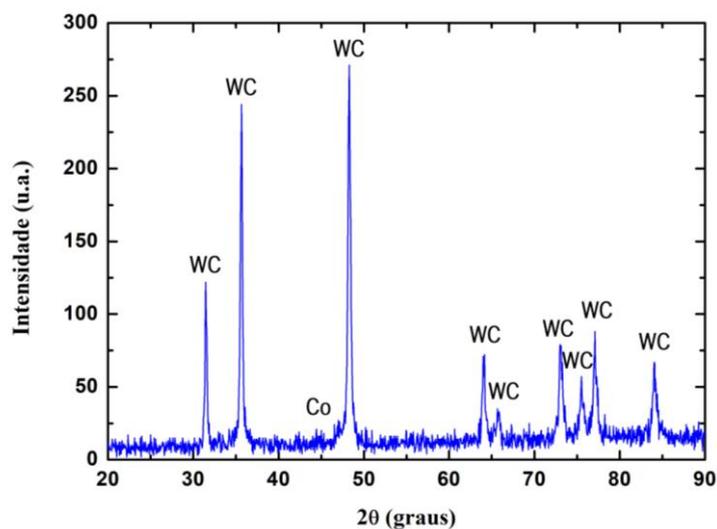


Figura 40: Difratoograma de raios-X do pó de WC-Co utilizado

3.1.2. Materiais Condutores

O cobre utilizado neste estudo apresentava a forma de grânulos esféricos com um elevado grau de pureza (99,9 %). Os grânulos de cobre utilizados podem ser observados na Figura 41 a).

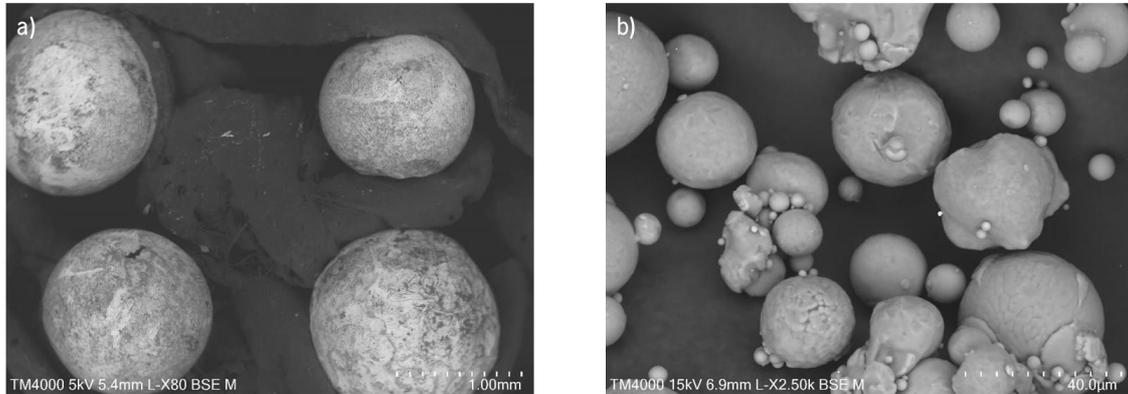


Figura 41: a) Grânulos de cobre utilizados; b) Pó de alumínio utilizado

Foi também utilizado alumínio na forma de pó (partículas esféricas) com um elevado grau de pureza (99,8 %) e tamanho médio de 45 µm (ver Figura 41 b)).

3.2. Métodos

Na Figura 42 é apresentado um fluxograma com a metodologia utilizada na parte experimental desta dissertação.

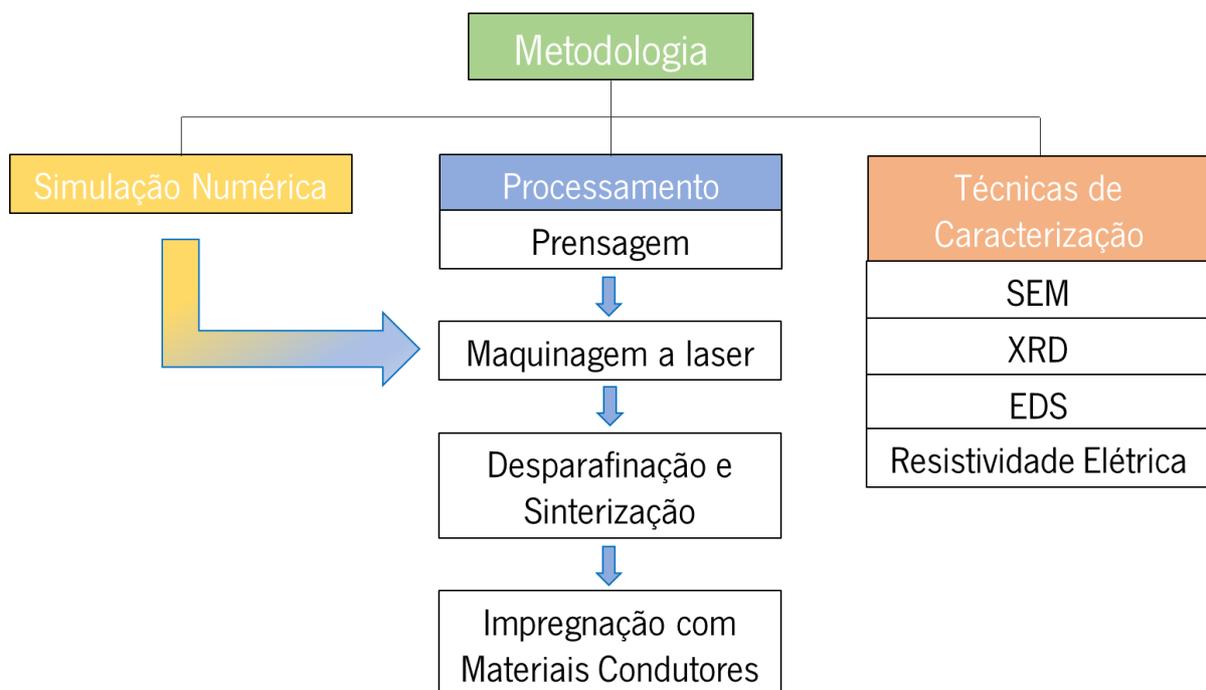


Figura 42: Fluxograma com a metodologia utilizada na parte experimental

3.2.1. Simulação Numérica

Para simular o comportamento térmico de uma ferramenta de corte de metal duro recorreu-se ao *software* SolidWorks. As dimensões escolhidas para a ferramenta de corte a desenhar neste *software* (Figura 43) foram 12,7 mm x 12,7 mm x 4,7 mm, indo de encontro às dimensões de umas das pastilhas fabricadas pela empresa Palbit S.A..

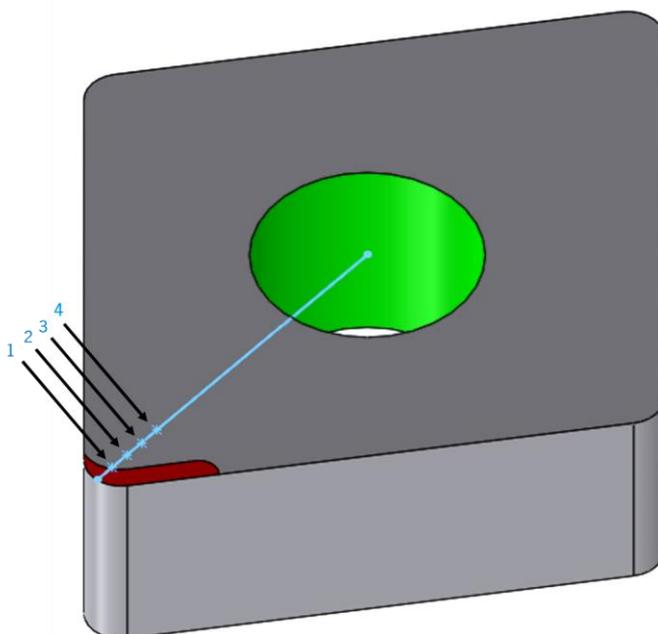


Figura 43: Ferramenta de corte de metal duro

A Tabela 5 apresenta as propriedades termo físicas da ferramenta de metal duro e do cobre utilizadas nas simulações numéricas do presente trabalho.

Tabela 5: Parâmetros térmicos dos materiais utilizados nas simulações numéricas

Propriedade	Ferramenta de metal duro [6]	Cobre [86]
Massa Específica, ρ (Kg m^{-3})	14900	8900
Calor Específico, C_p ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	333	390
Condutividade Térmica, k ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	43	390

A Figura 43 apresenta a zona de aplicação de temperatura, a vermelho, pretendendo simular a aresta de corte, e os pontos (1, 2, 3 e 4) onde foi medida a temperatura para efeitos de análise da temperatura, distando 0,5 mm entre eles, sendo que o primeiro ponto está a 0,5 mm da ponta da ferramenta. Admitiu-se que a temperatura entre o contacto da ferramenta de corte com o suporte era

constante e de 30 °C, representada a verde na Figura 43. A temperatura aplicada foi considerada constante e de 700 °C. Para além disso também foi considerado o coeficiente de transferência térmica do ar (h) como sendo $20 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

A malha utilizada na simulação numérica é formada por elementos tetraédricos (Figura 44).

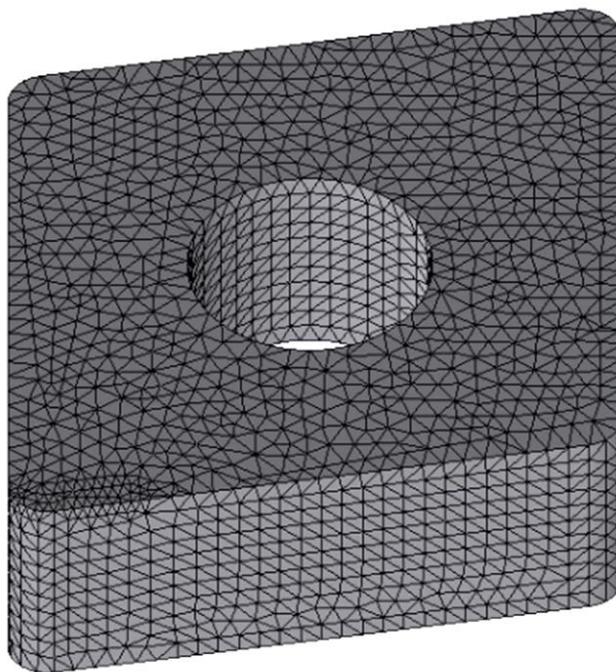


Figura 44: Malha utilizada na simulação numérica

Na presente análise os seguintes pressupostos foram considerados:

- Regime estacionário;
- Ausência de modelos de radiação;
- As propriedades térmicas tais como a massa específica, condutividade térmica e o calor específico são independentes da temperatura;
- Existe um contato térmico perfeito e não existe nenhuma resistência térmica de contato;
- Não existe nenhuma geração de energia interna;

3.2.2. Processamento

1. Prensagem de pós

O equipamento utilizado para a prensagem das amostras foi uma prensa hidráulica MEGA (Figura 45), que se encontra presente no Laboratório de Micro Fabricação e Sistemas Integrados no Departamento de Engenharia Mecânica.



Figura 45: Equipamento de prensagem (MEGA)

O pó de metal duro (cerca de 4,2 gramas) foi compactado uniaxialmente com uma pressão de 200 MPa durante um tempo controlado de 30 segundos. Foi utilizado um punção de forma cilíndrica com um diâmetro de 12 mm (ver Figura 46). A Figura 47 pretende ilustrar a geometria e dimensões das amostras obtidas.



Figura 46: Matriz utilizada na prensagem das amostras

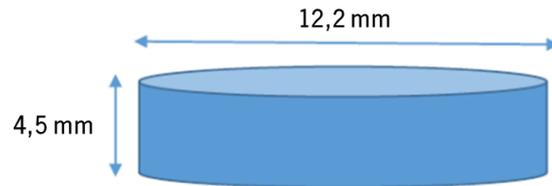


Figura 47: Geometria e dimensões das amostras obtidas

As amostras obtidas têm uma densidade relativa de cerca de 56 %, uma vez que a sua densidade aparente é de $7,98 \text{ g/cm}^3$.

2. Maquinagem a laser

Após a obtenção das amostras prensadas a etapa seguinte consiste na maquinagem a laser para obtenção dos canais de escoamento de calor.

Para esta etapa, o laser escolhido foi o Nd:YAG, pois vários estudos revelaram que este tipo de laser é o mais apropriado para metais [16,46]

Equipamento laser Nd:YAG

O equipamento laser Nd:YAG utilizado é um produto Sisma, localizado no Laboratório de Micro Fabricação e Sistemas Integrados no Departamento de Engenharia Mecânica. Este equipamento pode ser observado na Figura 48.



Figura 48: Equipamento laser Nd:YAG (Sisma)

Este laser está conectado a um computador que incorpora o software *Sisma Laser Controller* que permite ao controlador selecionar os parâmetros pretendidos. A Tabela 6 apresenta algumas das características do laser Nd:YAG utilizado.

Tabela 6: Características do laser Nd:YAG (Sisma)

Tipo de laser	Nd:YAG
Comprimento de Onda (nm)	1064
Potência Máxima (W)	6
Diâmetro do spot do laser (μm)	3

Além das características do laser, existem seis parâmetros que podem ser controlados. Estes parâmetros são enunciados e descritos de seguida, de modo a se perceber a sua importância e influência:

1. **Potência do laser:** representa a energia gerada pelo raio laser por segundo. Quanto maior a potência do laser maior a profundidade alcançada;
2. **Velocidade de varrimento:** indica a velocidade (em mm/s) com a qual o laser se move;
3. **Passagens:** corresponde ao número de passagens realizadas pelo laser;
4. **Amplitude do wobble:** representa a largura das linhas realizadas. Neste laser, a linha pode seguir diferentes rotas dependendo da amplitude escolhida. Quando a amplitude do wobble corresponde ao diâmetro do spot do laser, a linha criada será uma reta. Se a amplitude do wobble é maior que o diâmetro do spot do laser, a linha será criada de forma helicoidal (ver Figura 49);
5. **Frequência do wobble:** corresponde ao número de espirais que o laser faz por segundo. Por exemplo, usando a frequência de 1000 Hz a uma velocidade de 10 mm/s, o laser faz 1000 espirais em 10 mm;
6. **Espaçamento entre linhas:** indica a distância entre linhas;

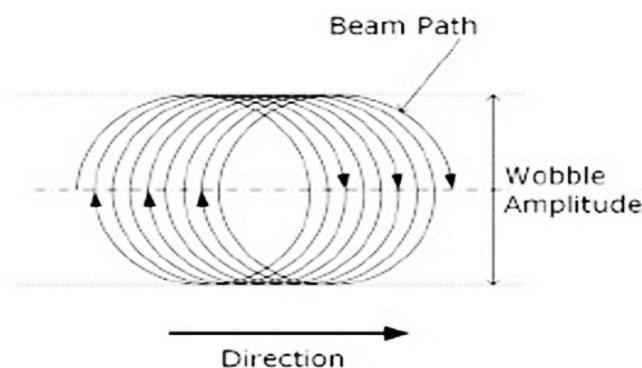


Figura 49: Representação esquemática do efeito da amplitude do wobble na maquinagem a laser

Estudo dos parâmetros do laser para a maquinagem

Neste estudo, diferentes parâmetros foram testados de modo a se perceber a sua influência na maquinagem a laser das amostras a verde. Os parâmetros foram selecionados de modo a que todas as potencialidades do laser fossem abrangidas e a que uma grande gama de combinações fossem testadas. Foram realizados dois estudos: um estudo inicial e um estudo complementar. No final foi ainda realizada uma etapa de acabamento.

Em ambos os estudos, a frequência do wobble e o espaçamento entre linhas foram mantidos constantes, a 550 Hz e 0,5 mm, respetivamente. Foi utilizado um fluxo de ar para remoção dos produtos provenientes da ação do laser.

Estudo inicial

Neste estudo, diferentes parâmetros foram testados para a produção de linhas (cada linha corresponde a uma experiência), cujo design está representado na Figura 50.

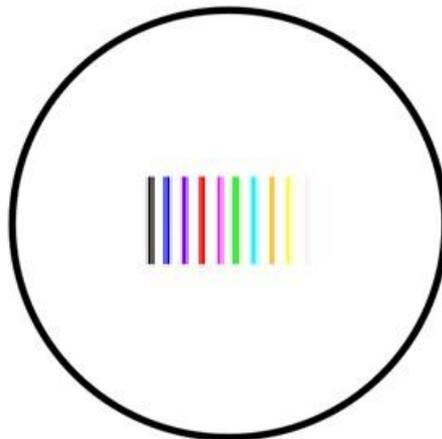


Figura 50: Representação do design utilizado no estudo inicial

Na Tabela 7 estão listados os parâmetros do laser utilizados no estudo inicial.

A densidade de energia utilizada em cada linha (em J/mm) foi calculada usando a seguinte equação:

$$\text{Densidade de energia (E)} = \frac{P}{V} \times N \quad (\text{Equação 5})$$

em que:

P = Potência do laser (W);

V = Velocidade de varrimento (mm/s);

N = Número de passagens;

Tabela 7: Parâmetros utilizados no estudo inicial

Experiência	Potência (W)	Velocidade de varrimento (mm/s)	Número de passagens	Densidade de energia (J/mm)
i1)	0,75	64	1, 2, 4, 8 e 16	0,01; 0,02; 0,05; 0,09; 0,19
i2)	1,5	64	1, 2, 4, 8 e 16	0,02; 0,05; 0,09; 0,19; 0,38
i3)	3	64	1, 2, 4, 8 e 16	0,05; 0,09; 0,19; 0,38; 0,75
i4)	6	64	1, 2, 4, 8 e 16	0,09; 0,19; 0,38; 0,75; 1,5
i5)	0,75	128	1, 2, 4, 8 e 16	0,01; 0,01; 0,02; 0,05; 0,09;
i6)	1,5	128	1, 2, 4, 8 e 16	0,01; 0,02; 0,05; 0,09; 0,19
i7)	3	128	1, 2, 4, 8 e 16	0,02; 0,05; 0,09; 0,19; 0,38
i8)	6	128	1, 2, 4, 8 e 16	0,05; 0,09; 0,19; 0,38; 0,75
i9)	0,75	256	1, 2, 4, 8 e 16	0,00; 0,01; 0,01; 0,02; 0,05;
i10)	1,5	256	1, 2, 4, 8 e 16	0,01; 0,01; 0,02; 0,05; 0,09;
i11)	3	256	1, 2, 4, 8 e 16	0,01; 0,02; 0,05; 0,09; 0,19
i12)	6	256	1, 2, 4, 8 e 16	0,02; 0,05; 0,09; 0,19; 0,38

Depois da produção das linhas, as mesmas foram analisadas recorrendo à microscopia eletrônica de varrimento (SEM), para se obter informação acerca dos efeitos do laser no compacto a verde e da qualidade das linhas produzidas. Após análise dos resultados obtidos as melhores condições foram selecionadas. Os resultados deste estudo serão discutidos no subcapítulo 4.2.

Estudo complementar

Após o estudo inicial, um estudo complementar foi realizado visando otimizar as melhores combinações de parâmetros, selecionadas do estudo inicial.

Assim sendo, do estudo inicial foram selecionadas 10 condições (ver Tabela 8) e em cada condição foi variado o espaçamento entre linhas, de 10 até 100 μm com um incremento de 10 μm , de modo a maquinar áreas. O design utilizado neste estudo está representado na Figura 51.

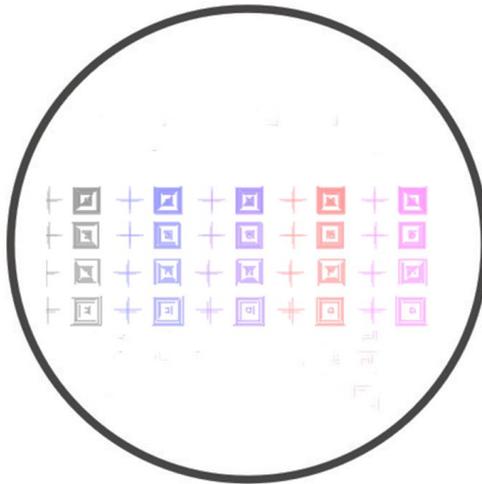


Figura 51: Representação do design utilizado no estudo complementar

Foi calculada a densidade de energia utilizada em cada área (em J/mm^2) (ver Anexo 1), usando a seguinte equação:

$$\text{Densidade de energia (E)} = \frac{P}{V \times d} \times N \quad (\text{Equação 6})$$

Em que:

P = Potência do laser (W);

V = Velocidade de varrimento (mm/s);

d – Espaçamento entre linhas (mm);

N = Número de passagens;

Tabela 8: Parâmetros utilizados no estudo complementar

Experiência	Potência (W)	Velocidade de varrimento (mm/s)	Número de passagens	Espaçamento entre linhas (μm)
c1)	0,75	64	8	10:10:100
c2)	0,75	64	16	10:10:100
c3)	1,5	64	8	10:10:100
c4)	1,5	64	16	10:10:100
c5)	0,75	128	16	10:10:100
c6)	1,5	128	16	10:10:100
c7)	3	128	8	10:10:100
c8)	3	128	16	10:10:100
c9)	6	128	8	10:10:100
c10)	6	256	16	10:10:100

Depois da produção das áreas, as mesmas foram analisadas recorrendo, mais uma vez, à microscopia eletrônica de varrimento, para se obter informação acerca da qualidade das mesmas. Após a análise de todas estas condições, conclui-se que as condições ideais para a produção da geometria selecionada (Figura 52) após realização da simulação numérica, são as que se encontram na Tabela 9.

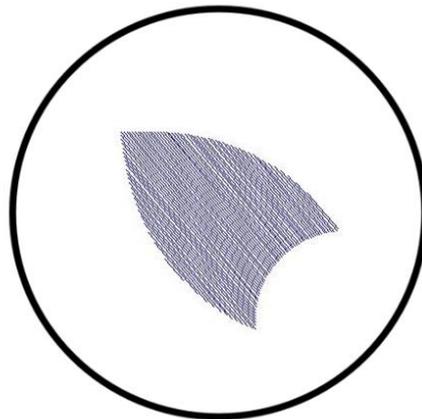


Figura 52: Representação do padrão final

A influência dos parâmetros usados na maquinagem a laser na qualidade superficial e no rigor dimensional e geométrico será discutida no subcapítulo 4.2.

Tabela 9: Parâmetros finais para a maquinação a verde da geometria final

Amostra	Potência (W)	Velocidade de varrimento (mm/s)	Número de passagens	Espaçamento entre linhas (mm)	Densidade de energia (J/mm ²)
1	0,75	64	8	0,07	1,34
2	1,5	64	8	0,06	3,13
3	1,5	64	16	0,09	4,17
4	3	128	8	0,08	2,34
5	6	128	8	0,07	5,36

Acabamento

De modo a melhorar o acabamento da área maquinação, nomeadamente nos seus limites, foi realizada uma etapa final, apenas para a condição que proporcionou os melhores resultados (condição 4 da Tabela 9), na qual se utilizou uma amplitude de wobble 7 μm , uma potência de 1,5 W e uma velocidade de 256 mm/s.

3. Desparafinação e Sinterização

A etapa de desparafinação consiste, tal como o nome indica, na remoção da parafina. Como já referido anteriormente a parafina tem como função aumentar a resistência a verde dos compactos. A sinterização permite a obtenção de uma peça densa com as propriedades finais desejadas, ocorrendo uma contração linear de aproximadamente 20%, como já referido anteriormente no subcapítulo 2.2.1.

A desparafinação e sinterização foram realizadas em etapas distintas na empresa Palbit S. A. segundo as suas especificações. A desparafinação foi realizada a 600 °C em atmosfera de hidrogénio e a sinterização a 1480 °C num forno SinterHIP (20 bar).

4. Impregnação com Materiais Condutores

Para impregnação dos materiais condutores nas geometrias maquinação foi utilizado um equipamento de soldadura por pontos (Electrex), localizado no Laboratório de Fundição no Departamento de Engenharia Mecânica, onde uma descarga elétrica local foi utilizada para promover a ligação entre o cobre e o metal duro e também entre o alumínio e o metal duro. De modo, a evitar a oxidação dos materiais foi utilizado argon durante todo o processo. Este equipamento pode ser observado na Figura 53.



Figura 53: Equipamento de soldadura por pontos (Electrex)

Este equipamento permite aplicar pressão durante o processo, forçando assim o cobre ou o alumínio a preencher a cavidade maquinada no WC-Co.

Os grânulos/pó foram prensados uniaxialmente para promover a deformação dos mesmos dentro da cavidade maquinada a laser, de seguida foi colocada no equipamento de soldadura por pontos sendo feitas seis descargas, cada uma com uma potência de 30 kW durante 10 segundos.

3.3. Técnicas de Caracterização

3.3.1. Microscopia Eletrónica de Varrimento (SEM)

A microscopia eletrónica de varrimento, vulgarmente conhecida por SEM (do inglês *scanning electron microscopy*), é uma técnica de análise não destrutiva capaz de produzir imagens de alta resolução da superfície da amostra com uma ampliação de até 500 000x. Esta técnica permite revelar informações como a morfologia, a textura, a composição química, as estruturas cristalinas e a orientação dos materiais constituintes da amostra. Na Figura 54 encontra-se um esquema do SEM.

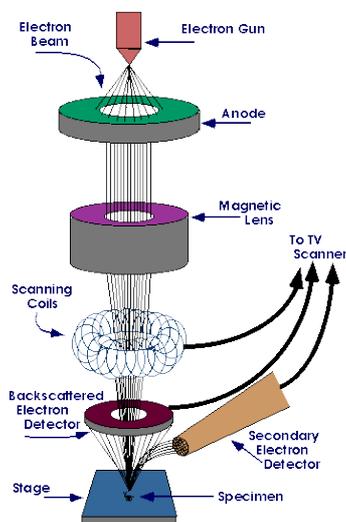


Figura 54: Esquema representativo do SEM

Esta técnica utiliza um feixe de elétrons de alta energia, que é emitido por um cátodo geralmente de tungstênio aquecido por uma corrente elétrica e acelerados através de um ânodo. Posteriormente um sistema de lentes focaliza o feixe de elétrons reduzindo o seu diâmetro a aproximadamente 100 Å. A redução é realizada usando duas ou mais lentes magnéticas em série, cada uma capaz de reduzir o diâmetro do feixe de elétrons num fator de 20 a 100 vezes [87,88].

O princípio de funcionamento desta técnica consiste na produção de um feixe de elétrons de alta energia (10 a 50 keV) que ao colidir com uma amostra vai dissipar essa energia gerando uma variedade de sinais característicos das interações entre os elétrons e a amostra. Estes sinais, entre outros, incluem elétrons secundários, elétrons retrodifundidos, elétrons retrodifundidos difratados e raios-X, variando o número de elétrons emitidos de acordo com a geometria e outras propriedades da amostra. Os elétrons secundários e os retrodifundidos são usados na geração de imagens SEM, sendo os elétrons secundários usados para obter a morfologia e topografia das amostras e os elétrons retrodifundidos usados para ilustrar contrastes em amostras que têm fases de diferentes composições. Os elétrons retrodifundidos difratados são usados para determinar estruturas cristalinas e as suas orientações. Os raios-X produzidos permitem fazer análises elementares quantitativas e qualitativas, ou seja, determinar a composição química da amostra através de uma técnica de análise, o EDS que geralmente está associada ao SEM e do qual se falará de seguida [87,88].

A caracterização das amostras por esta técnica é essencial pois permite avaliar as alterações nas amostras devido à alteração das diferentes condições de processamento, tais como potência do laser, velocidade de varrimento e distância entre varrimentos do laser.

Para esta caracterização foi utilizado o equipamento NanoSEM – FEI Nova 200 (FEG/SEM), ver Figura 55. Este equipamento pertence ao SEMAT da Universidade do Minho.



Figura 55: Equipamento SEM

3.3.2. Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS)

A espectroscopia de energia dispersiva de raios-X, vulgarmente conhecida por EDS (do inglês *energy dispersive X-ray spectroscopy*), é uma técnica não destrutiva que permite a determinação da composição química da amostra analisada.

O princípio de funcionamento desta técnica consiste na deteção dos raios-X emitidos por uma amostra quando esta é bombardeada por um feixe de eletrões de alta energia (10 a 50 keV). Os eletrões do feixe de alta energia que bombardeiam a amostra promovem a remoção de eletrões das orbitais interiores (baixa energia) da amostra, formando uma lacuna. Esta lacuna é preenchida por eletrões de orbitais mais energéticas e a esta transição está associada a emissão de raios-X com uma energia que corresponde à diferença de energia dos níveis envolvidos. Cada elemento atómico tem vários níveis de energia, logo existem várias possibilidades de remoções de eletrões de diferentes níveis energéticos, como tal também existem várias possibilidades de eletrões de níveis energéticos superiores ocuparem as vagas deixadas pelos eletrões removidos. Como consequência, mesmo os elementos puros emitem raios-X com diferentes energias, mas como cada elemento tem uma estrutura atómica característica e diferenciada dos restantes assim também cada elemento terá um espectro de emissão de raios-X característico e diferenciado dos restantes elementos. Como tal, através da deteção dos diferentes espectros de raios-X emitidos pelo material é possível identificar os elementos que fazem parte da sua constituição. A intensidade com que cada espectro de raios-X atinge o detetor permite a quantificação de cada elemento. Os picos de energia correspondem aos vários elementos da amostra e regra geral eles são estreitos e facilmente identificáveis, mas há que ter em conta que alguns elementos apresentam picos múltiplos e que os picos de elementos em baixa concentração podem ser ocultados pela radiação de “fundo”. Além disto, esta técnica tem outras limitações, como a sobreposição de picos de diferentes elementos, logo um pico pode corresponder a vários elementos o que em alguns casos pode dificultar uma correta análise. Outra limitação é na dificuldade de deteção de elementos atómicos leves, tipicamente com números atómicos inferiores ao sódio (Na) [89].

A caracterização das amostras por esta técnica é importante pois permite avaliar as alterações químicas nas amostras em relação à composição inicial.

O equipamento utilizado nesta técnica, em regra geral está integrado no equipamento usado no SEM. Consiste num detetor de raios-X, um tanque de armazenamento de azoto líquido para arrefecimento e um *software* para recolha e análise dos dados. Nesta caracterização foi usado o equipamento EDAX-Pegasus X4M, instalado no equipamento que foi utilizado na caracterização anteriormente descrita (SEM).

3.3.3. Difração de Raios-X (XRD)

A difração de raios-X, vulgarmente conhecida por XRD (do inglês X-ray diffraction) é uma técnica de análise não destrutiva que permite a caracterização de materiais cristalinos ou semicristalinos, através da determinação e quantificação das suas fases cristalinas constituintes. Além disto, esta técnica permite também determinar o tamanho dos cristais, as tensões internas e direções de crescimento preferencial destes cristais.

O comprimento de onda desta radiação é da mesma ordem de grandeza das distâncias interplanares nos sólidos cristalinos, ou seja, da ordem do Å, tornando assim possível a observação do fenómeno de difração, permitindo deste modo obter picos de difração de várias intensidades quando o feixe de raios-X interage com um sólido cristalino.

O princípio de funcionamento desta técnica baseia-se na incidência de um feixe monocromático de raios-X sobre o material a analisar e posterior deteção dos fotões difratados, que constituem o feixe difratado. Quando o material a analisar tem os seus átomos dispostos periodicamente (rede cristalina), característica das estruturas cristalinas, o fenómeno de difração de raios-X ocorre nas direções que satisfazem a Lei de Bragg (Equação 7), ou seja só ocorrem com determinados ângulos de incidência, este fenómeno está ilustrado na Figura 56 [90,91].

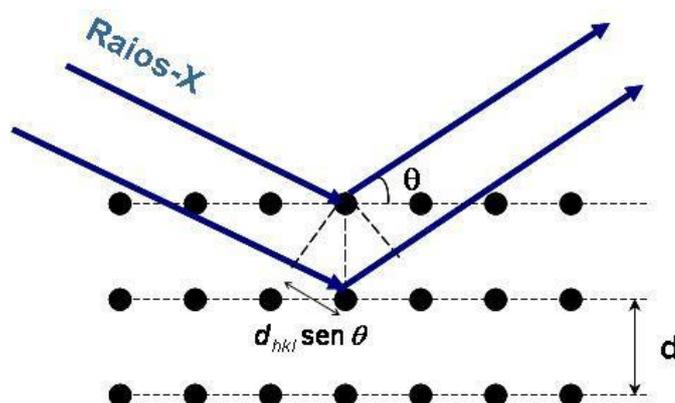


Figura 56: Difração de raios-X segundo a lei de Bragg

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

n – número inteiro (1,2,3,...);

λ – comprimento de onda do feixe de raios-X;

d – distância interplanar;

θ – ângulo de incidência do feixe de raios-X;

Para a rede cúbica com uma constante de rede, a , o espaçamento dos planos da rede podem ser expressos usando os índices de Miller h, k, l :

$$d_{h,k,l}^2 = \frac{a^2}{(h^2+k^2+l^2)} \quad (\text{Equação 8})$$

Os difratogramas correspondem aos gráficos obtidos durante a análise da amostra, estes representam graficamente o padrão de intensidade dos raios-X que atingem o detetor versus o ângulo 2θ . O ângulo é de 2θ devido ao arranjo geométrico do detetor segundo uma geometria do tipo Bragg-Brentano, que possibilita a obtenção do ângulo 2θ . Quando num difratograma surge um pico, significa que nesse ângulo houve fenômenos de interferência construtiva entre as ondas incidentes, levando à difração do feixe incidente por um determinado conjunto de planos do cristal, que possuem a mesma distância interplanar, cada qual com índices de Miller (h, k, l), respeitando assim a Lei de Bragg. Como cada composto cristalino apresenta um padrão difratométrico característico, através das informações obtidas como intensidade do pico, a posição angular (2θ), a distância interplanar e o perfil do pico é possível identificar as estruturas cristalinas presentes no material em análise, bem como outras propriedades acima referidas [90,91].

A caracterização das amostras por esta técnica é importante pois permite avaliar as fases presentes nas amostras, permitindo assim identificar a existência ou não de oxidação e se houve formação de novos compostos.

As análises de difração de raios-X foram efetuadas com um difractor Bruker D8 Discover, ver Figura 57, utilizando a radiação $K\alpha$ do cobre com comprimento de onda de $1,5418 \text{ \AA}$. Este equipamento pertence ao SEMAT da Universidade do Minho e está localizado na Escola de Ciências no polo de Azurém.

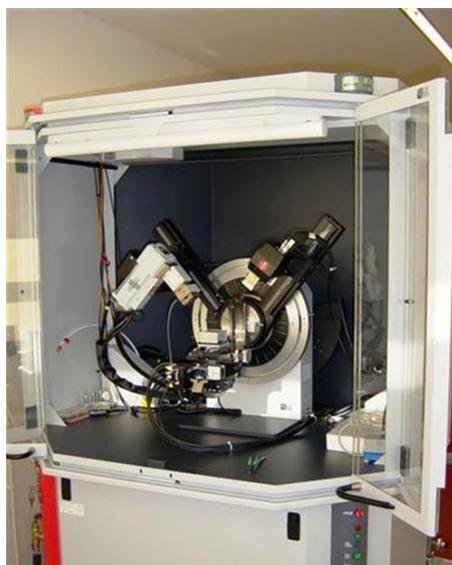


Figura 57: Equipamento XRD

3.3.4. Medição da Resistividade Elétrica

As técnicas de medição da resistividade elétrica consistem em medir a resistência a dois ou quatro pontos. A primeira é mais indicada para materiais menos condutores. Para materiais condutores, a resistividade é normalmente medida a quatro pontos, pelo facto de esta técnica, em comparação com a medição a dois pontos, eliminar os efeitos da resistência entre os contactos e a amostra, que levariam à medição de resistividades superiores à real [92]. Na Figura 58 encontra-se um esquema representativo da técnica de medição da resistividade elétrica a quatro pontos.

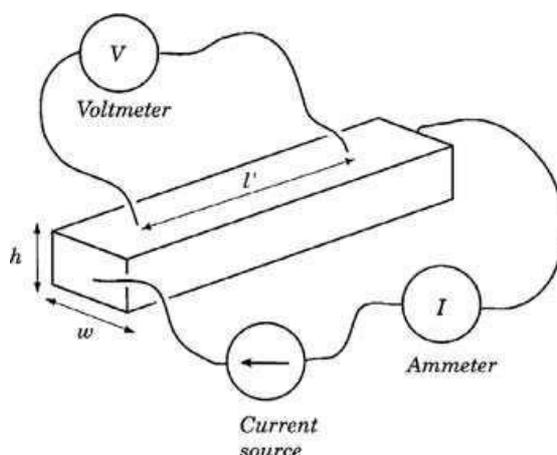


Figura 58: Esquema representativo da técnica de medição da resistividade elétrica a quatro pontos [93]

Os dois contactos nos extremos da amostra impõem uma corrente elétrica contínua (I) ao longo da barra, e os dois contactos interiores medem a diferença de potencial (V) da amostra ao longo da distância L . A resistividade (r) da amostra pode ser obtida pela Equação 9, onde A é a área da secção da amostra e L a distância entre os contactos interiores [93].

$$r = \frac{VA}{IL} \quad (\text{Equação 9})$$

Vários tipos de equipamentos podem ser utilizados para a medição a quatro pontos e a precisão da medição depende de inúmeros fatores. Um dos mais importantes é a realização de bons contactos elétricos com a amostra. Antes da aplicação dos mesmos, a superfície do material deve ser limpa com álcool ou outro solvente. Os contactos devem ser espaçados o suficiente para garantir que a condutividade ocorre somente pela amostra. Os contactos devem ser o mais pontuais possível e a distância entre os dois contactos interiores deve ser maior que a espessura da amostra. A medição deve ser efetuada com intensidades de corrente suficientemente baixas para evitar o aquecimento do material que pode alterar o valor da sua resistividade [92,93].

A resistividade elétrica foi determinada utilizando um equipamento de medição da resistividade elétrica a quatro pontos (ver Figura 59), que se encontra presente no Laboratório de Fotocondutividade no Departamento de Física.



Figura 59: Equipamento de medição da resistividade elétrica a quatro pontos

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

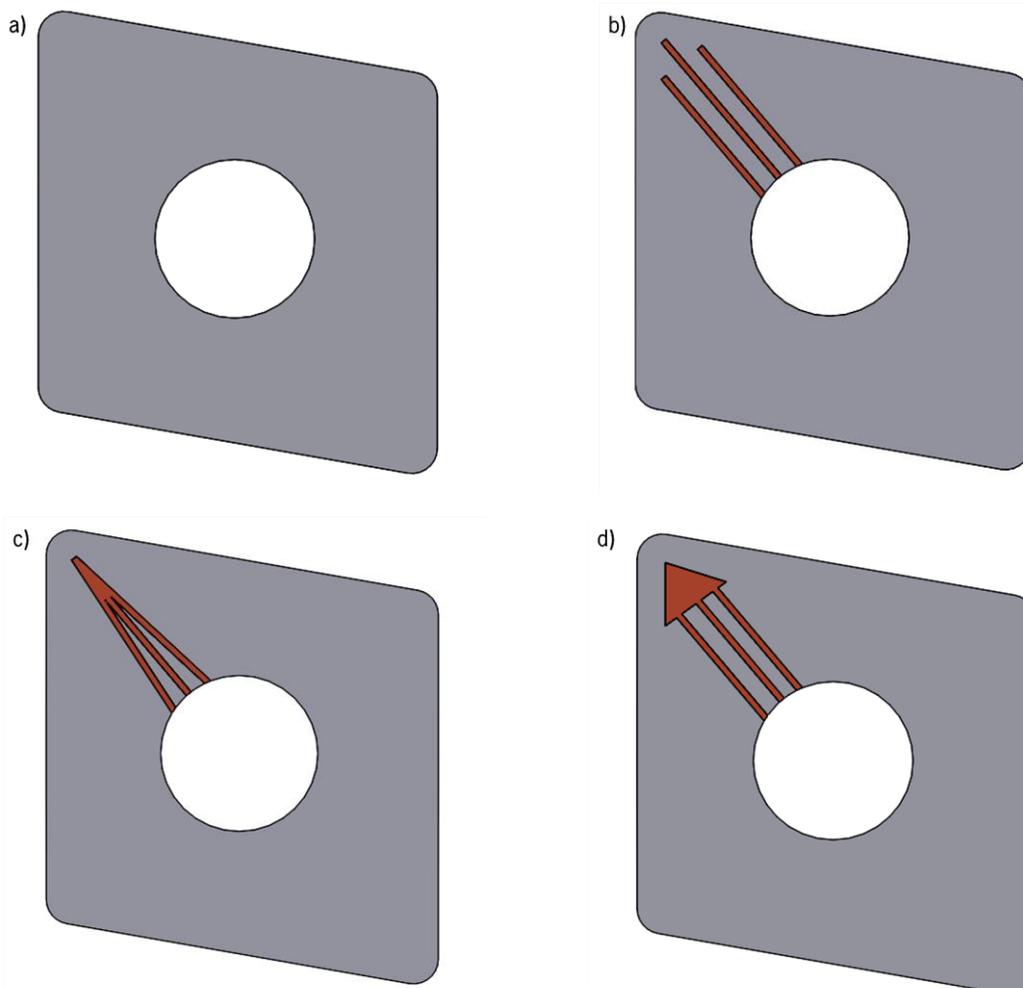
Neste capítulo são apresentados/discutidos os resultados das simulações numéricas assim como os resultados da maquinagem a laser das amostras e subsequente impregnação das mesmas com cobre e alumínio. São também apresentados/discutidos os resultados relativamente à capacidade de extração de calor das amostras produzidas.

4.1. Simulação Numérica

Inicialmente, foi simulado o comportamento térmico de uma ferramenta de corte constituída exclusivamente por WC e Co (Figura 60 a)), de modo a obter um padrão comparativo e representativo de uma ferramenta de corte convencional.

De seguida, foram testados vários designs diferentes para os canais de escoamento de calor, constituídos por cobre puro, como se pode observar na Figura 60 b), c), d), e) e f). Nestas simulações foi utilizada uma profundidade constante de 100 μm para os canais de escoamento, que se encontram em ambas as faces da ferramenta de corte.

Estes designs têm como objetivo reduzir a temperatura da ferramenta de corte, principalmente, na aresta de corte.



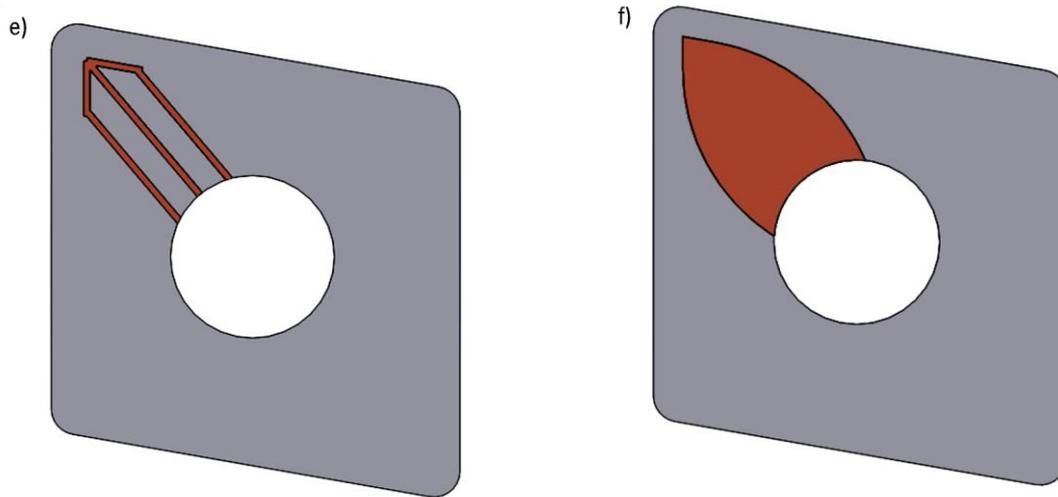


Figura 60: Designs testados nas simulações numéricas para canais de escoamento de calor

Na Figura 61 encontram-se os resultados das simulações numéricas para os diferentes designs testados, indicando a temperatura obtida em quatro pontos de referência (1 a 4).

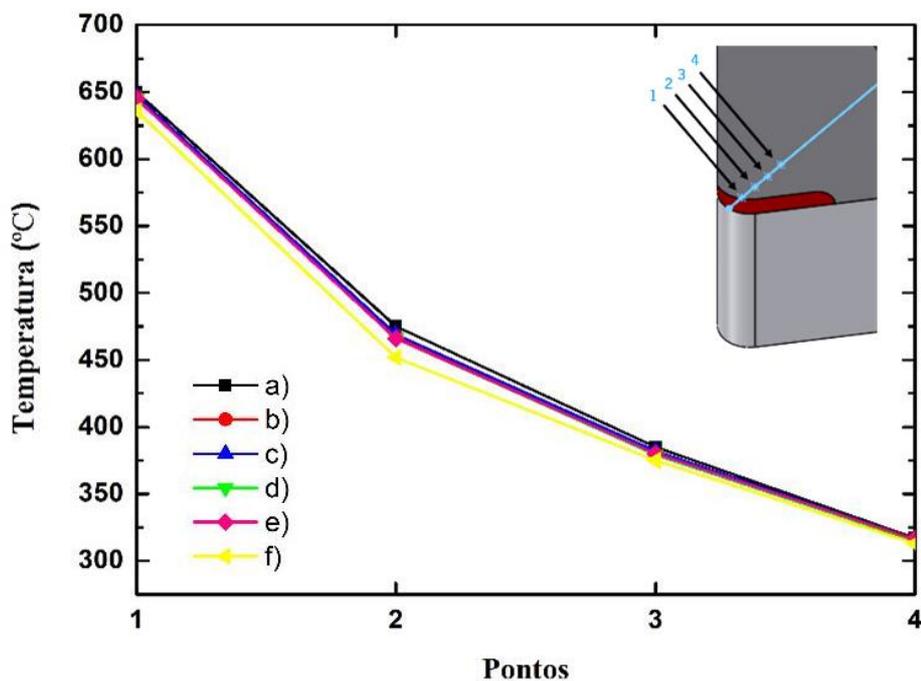


Figura 61: Resultados das simulações numéricas dos designs a) a f)

É possível verificar que as diferenças de temperatura entre a ferramenta de corte convencional e os designs testados não são significativas. O design f) foi o que apresentou melhores resultados (452 °C para o ponto 2 enquanto que o design a) apresenta 475 °C), o que indica que um maior volume de material condutor térmico leva a uma maior capacidade de extração de calor.

Como as diferenças de temperatura não são consideráveis, utilizando o design que proporcionou o melhor resultado (design f)) aumentou-se a profundidade dos canais para 500 μm (f1). Na Figura 62 encontram-se as dimensões do design f1) e na Figura 63 os resultados das mesmas.

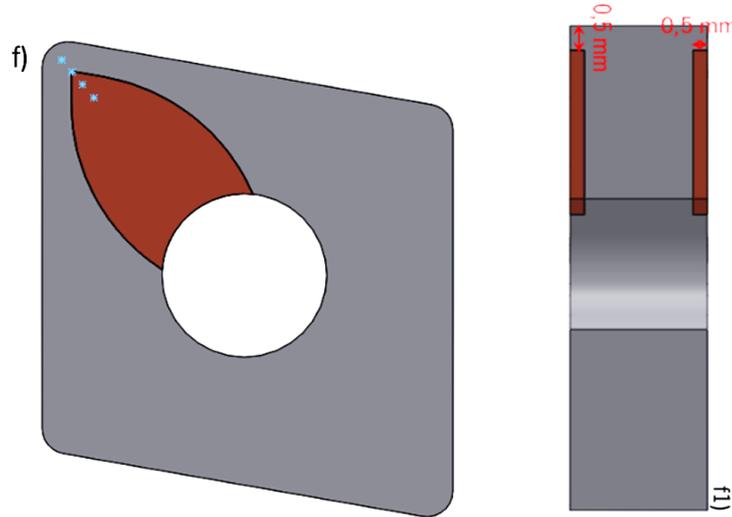


Figura 62: Design f1), com 500 μm de profundidade

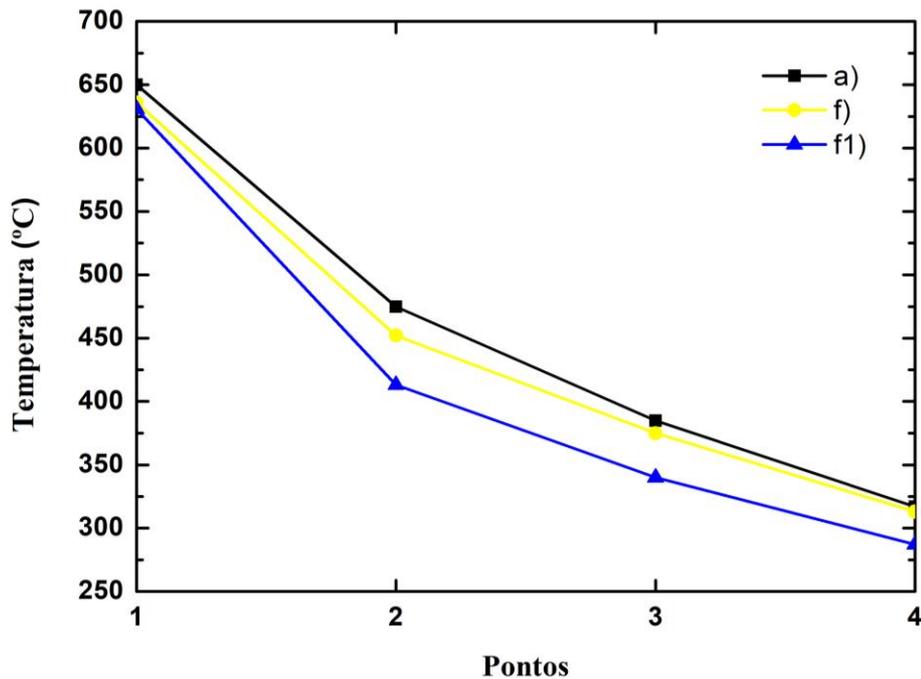


Figura 63: Resultados das simulações numéricas realizadas para o design f1), em comparação com os designs f) e a)

O design f1) permite baixar a temperatura na aresta de corte de forma significativa, atingindo um abaixamento máximo de 13 % no ponto 2 (413 $^{\circ}\text{C}$), sendo sempre superior aos 5 % de redução alcançados para f), em relação a a), concluindo-se mais uma vez que aumentando o volume de material condutor térmico aumenta a capacidade de extração de calor.

Esta redução de temperatura na aresta de corte, terá uma influencia significativa na redução do desgaste e conseqüente aumento da vida útil da mesma, pois como já referido anteriormente, as elevadas temperaturas geradas na zona de corte durante a maquinagem resultam num aumento dos mecanismos de desgaste e conseqüente redução da vida útil da ferramenta de corte [31,61,62].

De modo a perceber a influência da condutividade térmica do material usado na impregnação da amostra nos resultados obtidos, para além do cobre foram também simulados os comportamentos de outros materiais bons condutores térmicos, nomeadamente a prata, o ouro e o alumínio, cujas propriedades relevantes utilizadas nestas simulações estão presentes na Tabela 10.

Tabela 10: Materiais e propriedades utilizadas nas simulações numéricas

Material	Condutividade Térmica, k ($W m^{-1} K^{-1}$) [86]	Calor Específico, C_p ($J Kg^{-1} K^{-1}$) [86]	Massa Específica, ρ ($Kg m^{-3}$) [86]
Alumínio	230	900	2700
Cobre	390	390	8900
Ouro	300	130	19000
Prata	420	230	11000

Os resultados obtidos quando utilizando os diversos materiais condutores considerados podem ser observados na Figura 64, para uma pastilha contemplando o design f1).

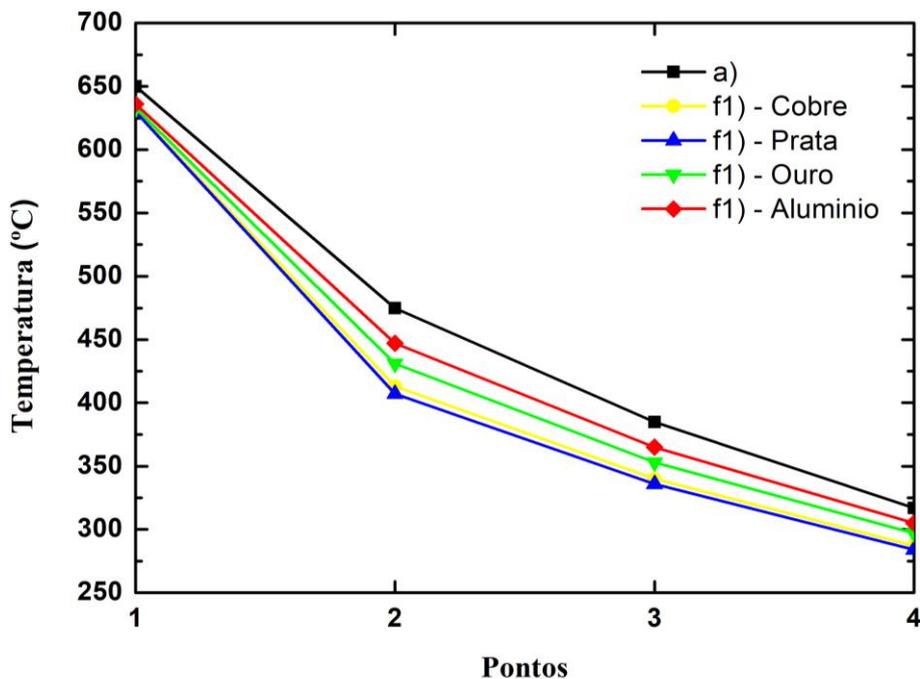


Figura 64: Resultados das simulações para diferentes materiais

Pode concluir-se pela análise da Figura 64 que o material que permite uma maior diferença de temperatura em relação à pastilha sem canais é a prata, pois como visível na Tabela 10 é o melhor condutor térmico. O cobre apresenta a segunda maior diminuição de temperatura, com uma diferença residual entre os resultados obtidos pela prata e pelo cobre. Uma vez que o cobre apresenta um custo significativamente mais baixo que a prata, este torna-se o melhor material para esta aplicação.

Foram ainda realizadas mais algumas simulações numéricas, variações do design f1), numa tentativa de baixar ainda mais a temperatura na aresta de corte. Estas simulações e os seus resultados encontram-se no Anexo II.

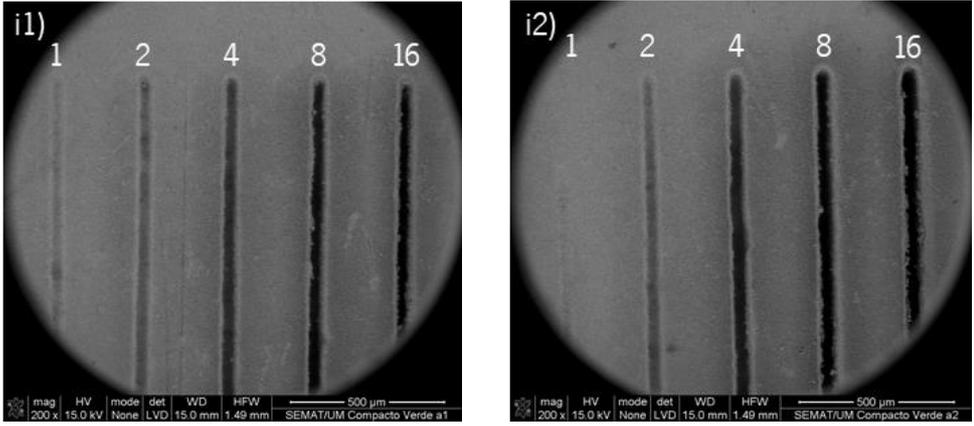
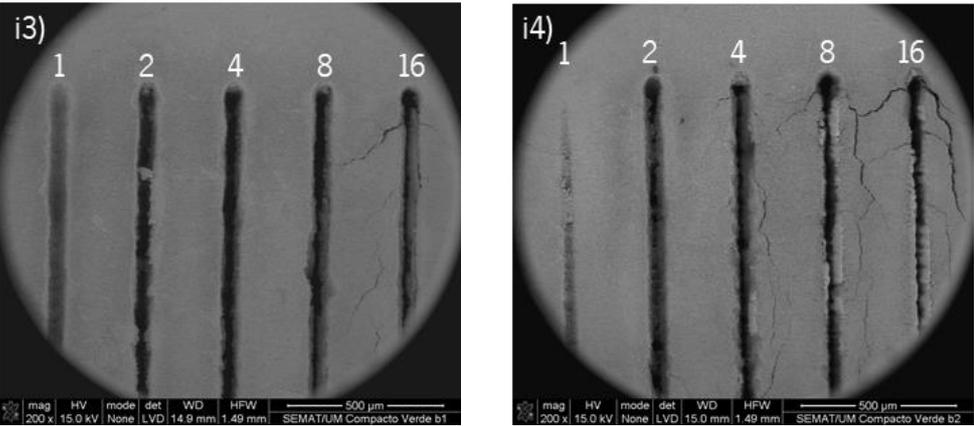
4.2. Influência dos parâmetros do laser na maquinagem

Estudo Inicial

Como indicado na Tabela 7, 12 combinações de parâmetros diferentes (experiências) foram testadas no estudo inicial.

A Tabela 11 apresenta os resultados para as experiências i1), i2), i3) e i4), que foram realizadas usando uma velocidade de 64 mm/s, fazendo variar a potência e o número de passagens.

Tabela 11: Resultados do estudo inicial: i1), i2), i3) e i4)

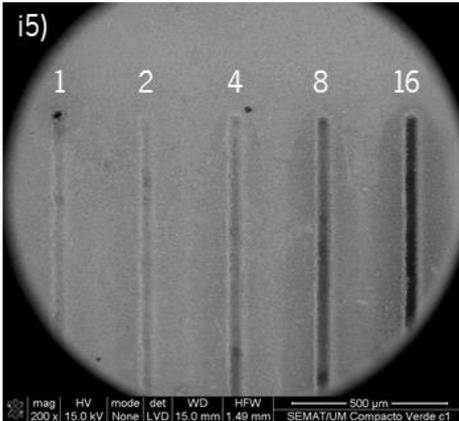
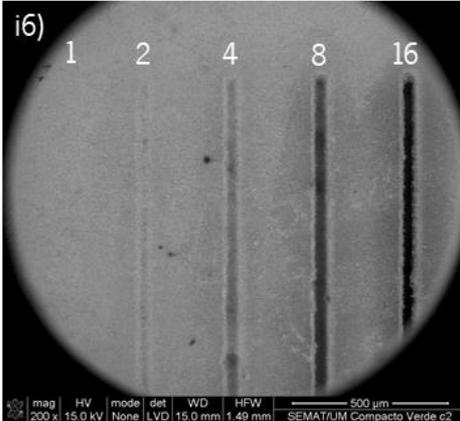
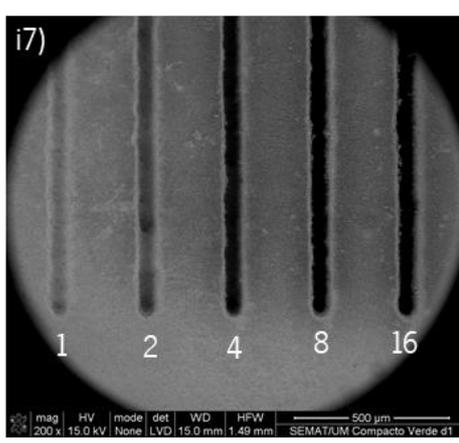
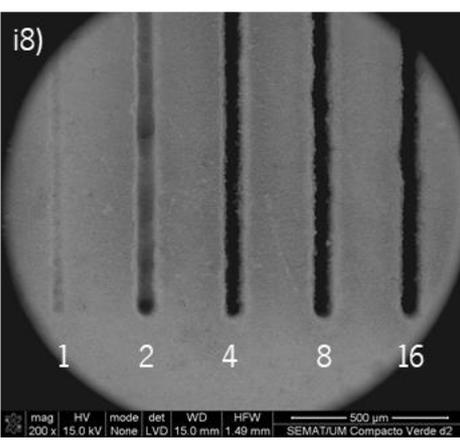
Velocidade (mm/s)	Potência (W)	
64	0,75	1,5
	3	6
		
		

Pode observar-se que para potências mais elevadas (3 e 6 W) e um elevado número de passagens (8 e 16), uma vez que como a velocidade de varrimento é baixa, a densidade de energia é muito elevada (1,5 J/mm para a amostra i4)16, sendo este o valor máximo atingido), levando à

formação de fissuras que comprometem a integridade do compacto a verde para posterior sinterização. Para as maiores potências a qualidade superficial dos rasgos produzidos é manifestamente baixa, pelos mesmos motivos.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados para as experiências i5), i6), i7) e i8), que foram realizadas usando uma velocidade de 128 mm/s, fazendo variar a potência e o número de passagens.

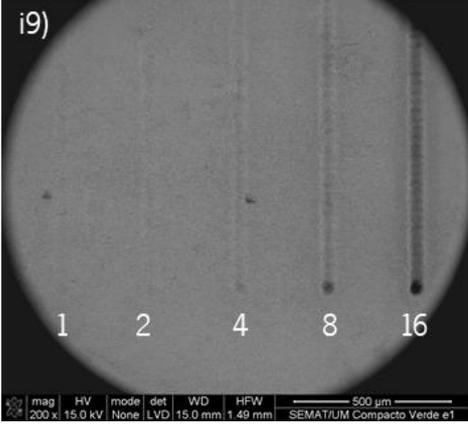
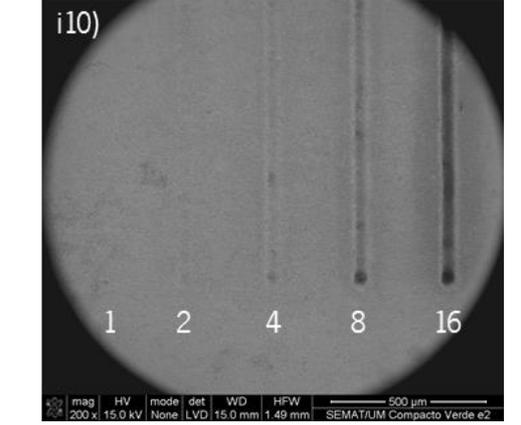
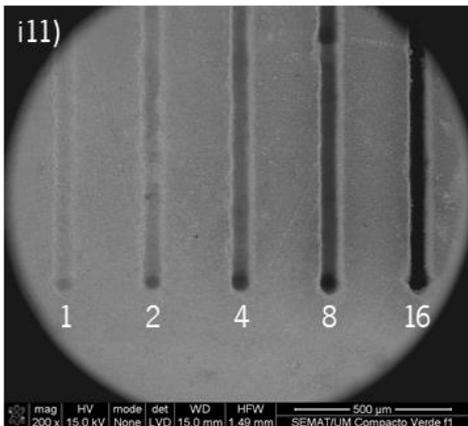
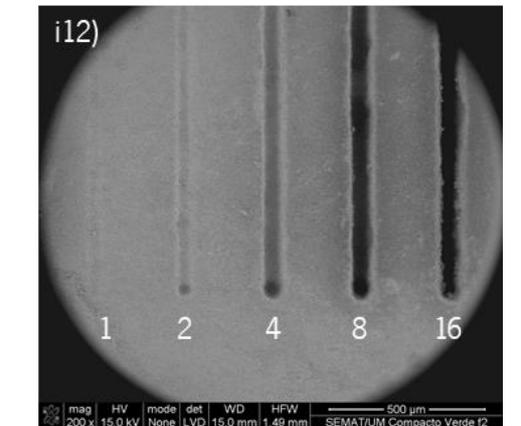
Tabela 12: Resultados do estudo inicial: i5), i6), i7) e i8)

Velocidade (mm/s)	Potência (W)			
128	0,75		1,5	
				
	3		6	
				

É possível verificar que para esta velocidade de varrimento (128 mm/s) não ocorrem fissuras visíveis. Comparando com as imagens anteriores verifica-se que para esta velocidade, a remoção de material é menor, sobretudo para baixas potências. Este efeito é mais pronunciado quanto menor for o número de passagens (compare-se i2)2 com i6)2).

A Tabela 13 apresenta os resultados para as experiências i9), i10), i11) e i12), realizadas com velocidade de 256 mm/s, novamente fazendo variar a potência e o número de passagens.

Tabela 13: Resultados do estudo inicial: i9), i10), i11) e i12)

Velocidade (mm/s)	Potência (W)			
256	0,75		1,5	
				
	3		6	
				

Como seria de esperar esta é a velocidade para a qual a remoção de material é menor, pois uma maior velocidade significa uma menor densidade de energia. Para esta velocidade a remoção de material é muito baixa, não tendo praticamente efeitos no compacto a verde, para potências de 0,75 e 1,5 W. Mesmo para potências superiores verificou-se uma baixa remoção de material quando utilizando menor número de passagens (1 e 2 sobretudo).

De modo geral, verificou-se que o aumento do número de passagens e/ou da potência levou à obtenção de rasgos aparentemente mais profundos.

Relativamente à zona termicamente afetada, de modo genérico, esta é tanto maior quanto maior for a densidade de energia.

É importante ressaltar que a análise isolada da densidade de energia utilizada em tecnologias laser não é por si só suficiente para ser utilizada como fator determinante. De facto, a mesma densidade de energia, obtida através da combinação de diferentes parâmetros (velocidade, potência, número de passagens, ...) resulta, não raras vezes em diferentes resultados ou propriedades [94,95].

Veja-se como exemplo, que para uma mesma densidade de energia de 0,01 J/mm (Figura 65), a remoção de material é significativamente diferente, sendo praticamente inexistente para i6). Já para i1) existe alguma remoção de material apesar de ser bastante pequena.

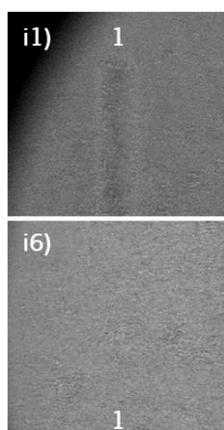


Figura 65: Rasgos obtidos usando uma passagem de laser com densidade de energia de 0,01 J/mm e usando i1) $v = 64$ mm/s, $P = 0,75$ W; i6) $v = 128$ mm/s, $P = 1,5$ W

Para uma densidade de energia de 0,19 J/mm (Figura 66), a remoção de material é maior para i12), pois a linha produzida é ligeiramente mais larga que a linha produzida em i2).

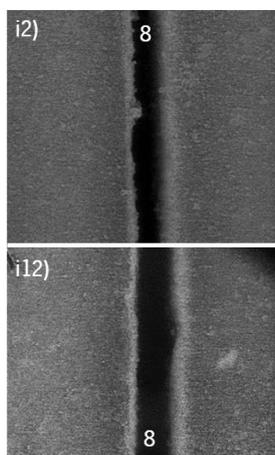


Figura 66: Rasgos obtidos usando oito passagens de laser com densidade de energia de 0,19 J/mm e usando i2) $v = 64$ mm/s, $P = 1,5$ W; i12) $v = 256$ mm/s, $P = 6$ W

Também para densidades de energia mais elevadas, 0,38 J/mm (Figura 67), verifica-se o mesmo, isto é, a remoção de material é diferente entre i2) e i7), produzindo um rasgo mais largo e com melhor acabamento superficial em i7).

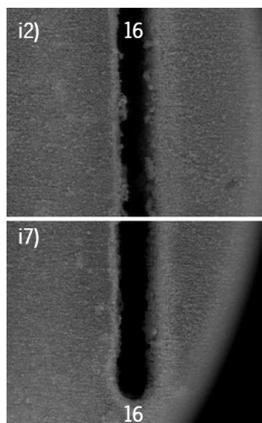
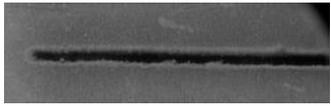
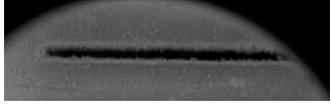
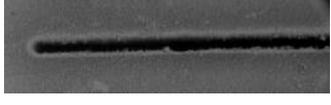
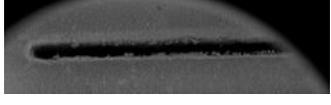
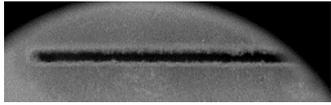
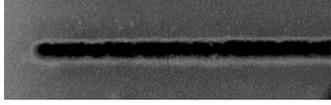
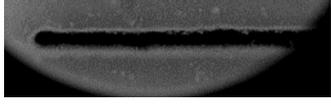
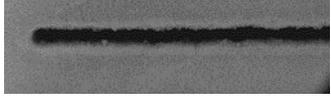
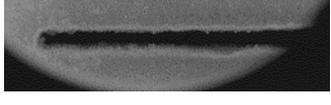


Figura 67: Rasgos obtidos usando dezasseis passagens de laser para uma densidade de energia de 0,38 J/mm e usando i2) $v = 64$ mm/s, $P = 1,5$ W; i7) $v = 128$ mm/s, $P = 3$ W

De seguida, na Tabela 14, é apresentado um quadro resumo com as melhores condições e respetivos resultados do estudo inicial.

Tabela 14: Quadro resumo do estudo inicial (condições e resultados)

Potência (W)	Velocidade de varrimento (mm/s)	Número de passagens	Densidade de Energia (J/mm)	Resultado
0,75	64	8	0,09	
0,75	64	16	0,19	
1,5	64	8	0,19	
1,5	64	16	0,38	
0,75	128	16	0,09	

1,5	128	16	0,19	
3	128	8	0,19	
3	128	16	0,38	
6	128	8	0,38	
6	256	16	0,38	

Estudo Complementar

Como indicado na Tabela 8, do estudo inicial foram selecionadas 10 condições e em cada condição foi variado o espaçamento entre linhas, de 10 até 100 μm com um incremento de 10 μm , de modo a maquinar áreas. Este estudo visou otimizar as melhores combinações de parâmetros, selecionadas do estudo inicial.

De seguida, na Figura 68 são apresentados os resultados do estudo complementar para c1), realizada com potência de 0,75 W, velocidade de 64 mm/s e 8 passagens, variando apenas o espaçamento entre linhas (indicado a branco nas imagens).

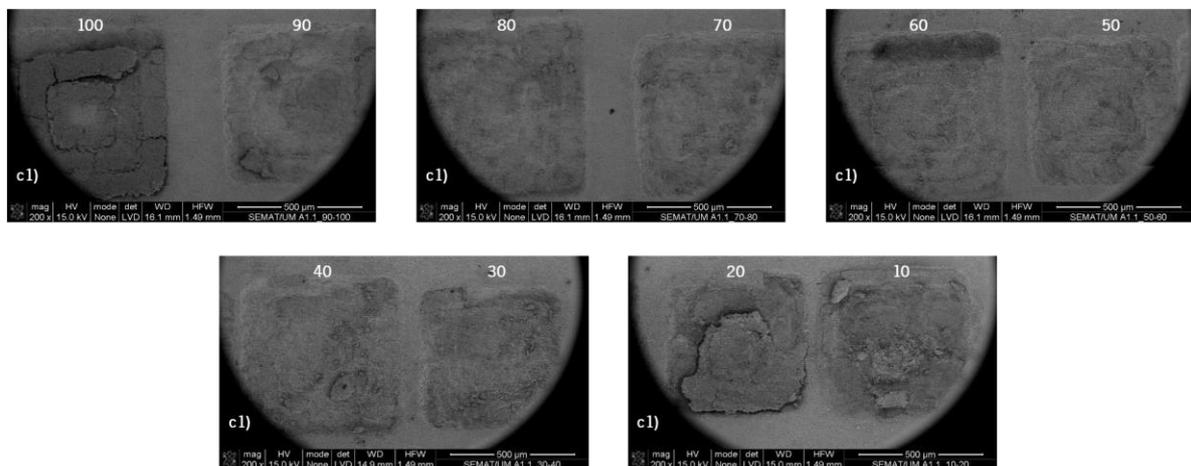


Figura 68: Resultados do estudo complementar: c1)

Pode observar-se que para espaçamentos entre linhas muito elevados, nomeadamente 100 μm , não ocorre remoção de material, pois a densidade de energia é muito baixa. Espaçamentos entre linhas muito pequenos resultam num acabamento superficial muito fraco, consequência das tensões criadas durante o processo de maquinagem devido a uma densidade de energia muito elevada. Para valores intermédios de espaçamento entre linhas, as áreas criadas apresentam um acabamento superficial razoável.

A Figura 69 apresenta os resultados do estudo complementar para c2), realizada com potência de 0,75 W, velocidade de 64 mm/s e 16 passagens.

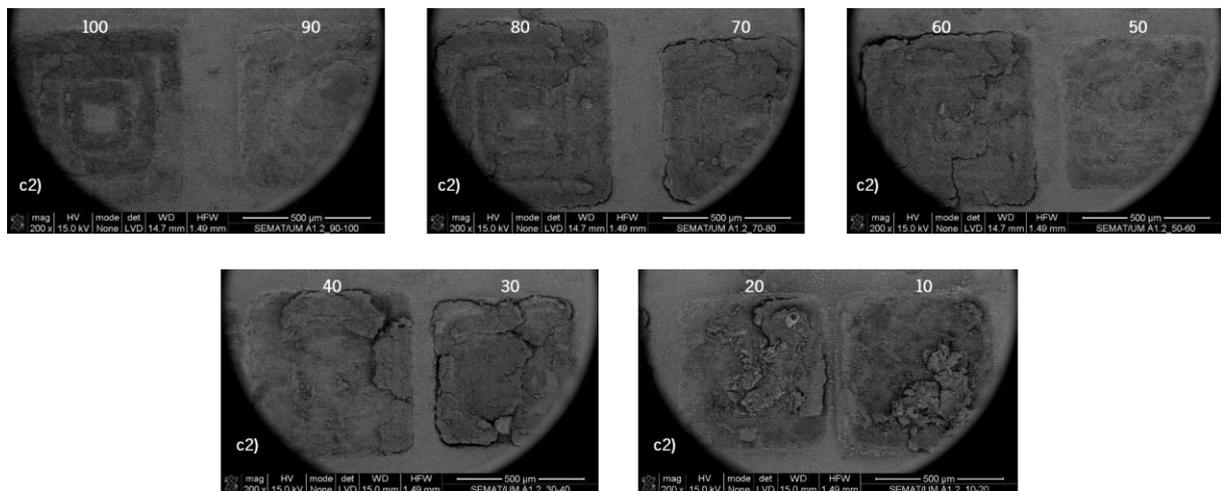


Figura 69: Resultados do estudo complementar: c2)

É possível verificar que o aumento do número de passagens para 16 fez com que a densidade de energia fosse demasiado elevada para alcançar o efeito pretendido. Comparando com a Figura anterior, pode observar-se que o acabamento superficial é inferior, resultado dessa mesma densidade de energia.

A Figura 70 apresenta os resultados do estudo complementar para c3), realizada com potência de 1,5 W, velocidade de 64 mm/s e 8 passagens.

Pode concluir-se que para um espaçamento entre linhas de 10, 20 e 30 μm ocorre fusão do cobalto devido à densidade de energia ser muito elevada, não havendo por isso remoção de material.

Comparando com a Figura 68, ou seja, variando apenas a potência, pode concluir-se que para espaçamentos entre linhas intermédios, o acabamento superficial aparenta ser ligeiramente melhor.

4. Resultados e Discussão

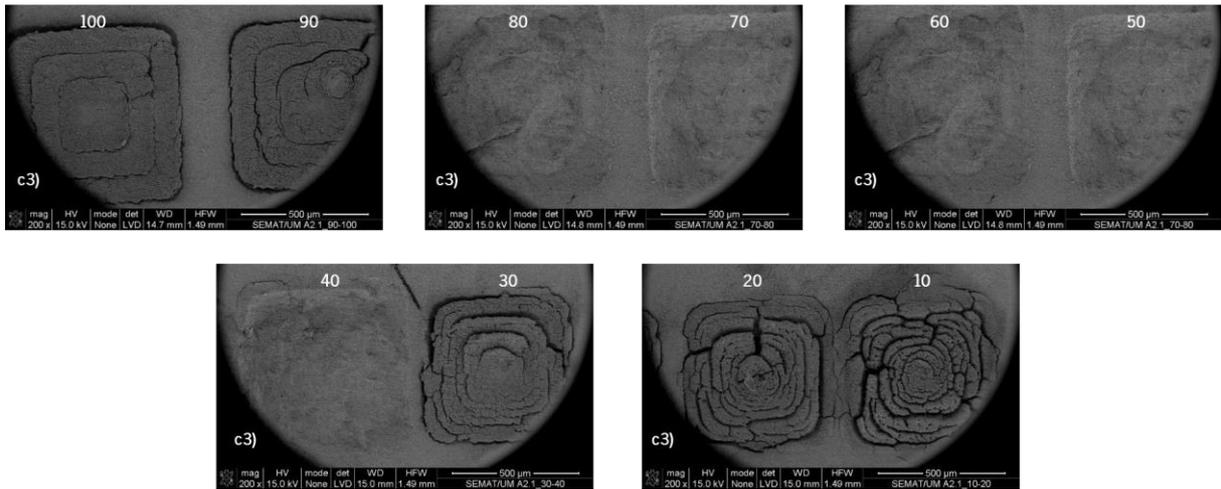


Figura 70: Resultados do estudo complementar: c3)

Na Figura 71 são apresentados os resultados do estudo complementar para c4), realizada com potência de 1,5 W, velocidade de 64 mm/s e 16 passagens.

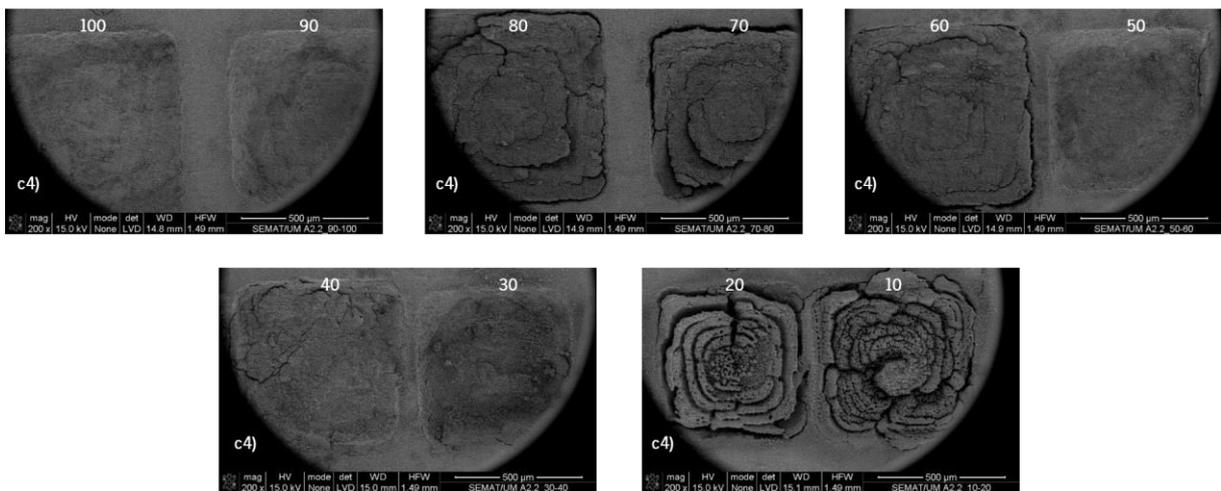


Figura 71: Resultados do estudo complementar: c4)

Comparando com a Figura anterior pode concluir-se que para espaçamentos entre linhas elevados, nomeadamente 100 e 90 μm , como foram realizadas 16 passagens, a densidade de energia já é suficiente para haver remoção de material, formando assim uma área maquinada. Para espaçamentos entre linhas pequenos ocorre fusão do cobalto.

A Figura 72 apresenta os resultados do estudo complementar para c5), realizada com potência de 0,75 W, velocidade de 128 mm/s e 16 passagens.

4. Resultados e Discussão

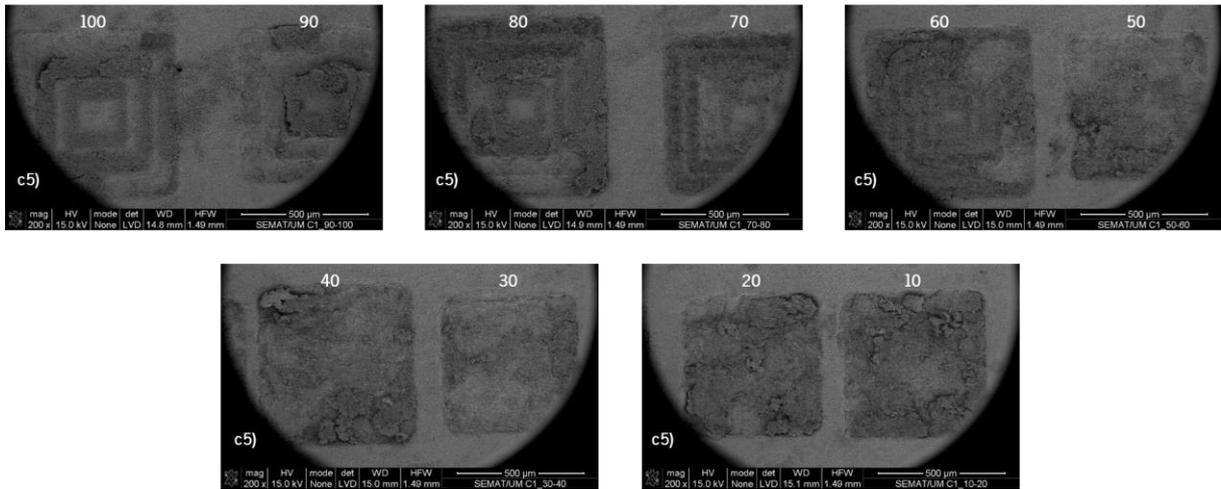


Figura 72: Resultados do estudo complementar: c5)

É possível verificar que a densidade de energia é muito baixa, pois praticamente não há remoção de material.

A Figura 73 apresenta os resultados do estudo complementar para c6), realizada com potência de 1,5 W, velocidade de 128 mm/s e 16 passagens.

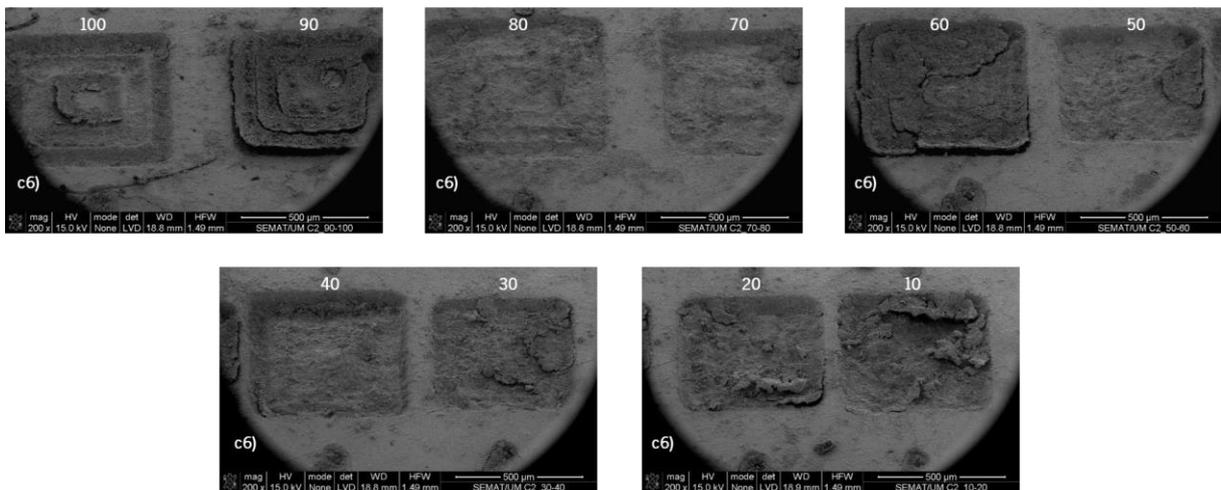


Figura 73: Resultados do estudo complementar: c6)

Verifica-se que a densidade de energia é suficiente para formar áreas para espaçamentos entre linhas intermédios.

Comparando com a Figura anterior verifica-se que o aumento da potência para 1,5 W, aumenta a remoção de material e melhora o acabamento superficial.

A Figura 74 apresenta os resultados do estudo complementar para c7), realizada com potência de 3 W, velocidade de 128 mm/s e 8 passagens.

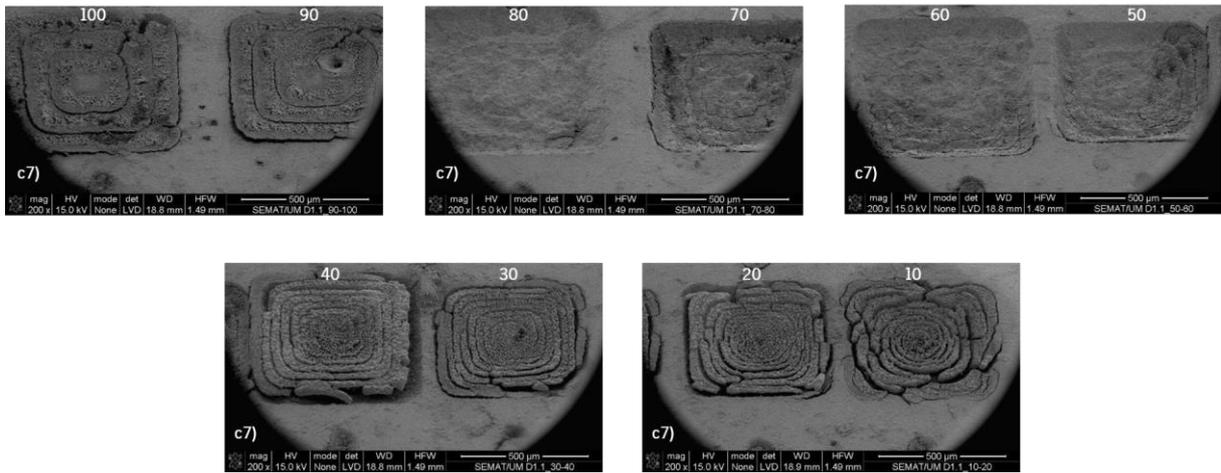


Figura 74: Resultados do estudo complementar: c7)

Pode concluir-se, mais uma vez, que para espaçamentos entre linhas elevados não ocorre remoção de material e para espaçamentos entre linhas reduzidos ocorre fusão do cobalto. Apenas para espaçamentos entre linhas intermédios é que há a formação de áreas maquinadas como pretendido.

Na Figura 75 são apresentados os resultados do estudo complementar para c8), realizada com potência de 3 W, velocidade de 128 mm/s e 16 passagens.

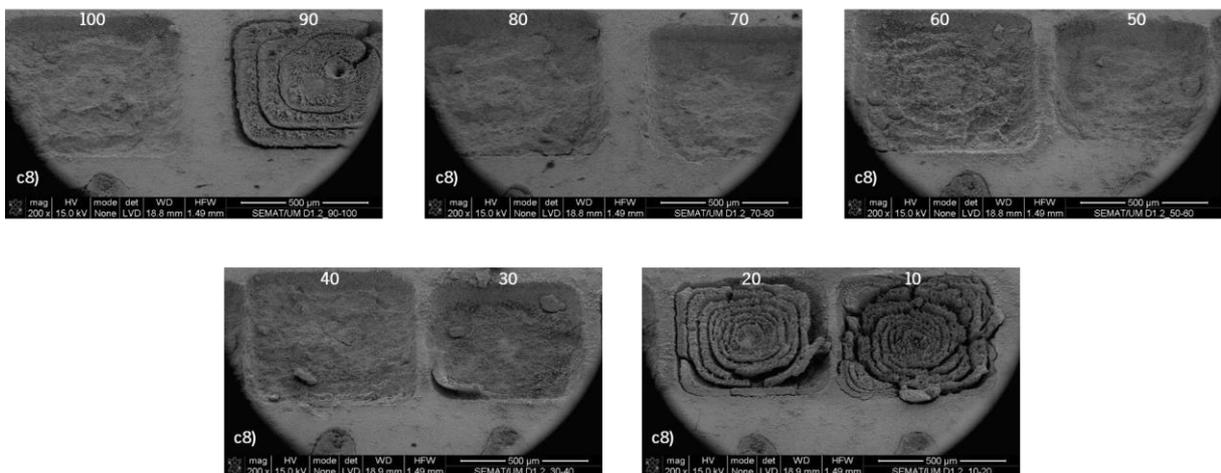


Figura 75: Resultados do estudo complementar: c8)

Como seria de esperar o aumento da potência, em relação à Figura 74 leva à formação de áreas maquinadas aparentemente mais profundas devido à densidade de energia ser maior. Os restantes efeitos são semelhantes.

A Figura 76 apresenta os resultados do estudo complementar para c9), realizada com potência de 6 W, velocidade de 128 mm/s e 8 passagens.

4. Resultados e Discussão

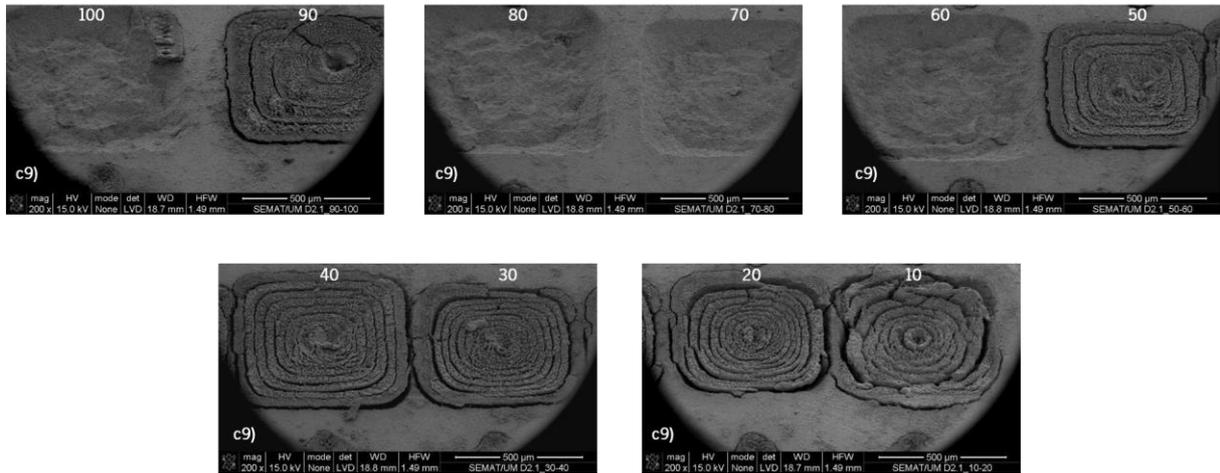


Figura 76: Resultados do estudo complementar: c9)

Como a densidade de energia é bastante elevada ocorre fusão do cobalto para um espaçamento entre linhas de 10 até 50 μm e mais uma vez verifica-se que o aumento da densidade de energia aumenta a remoção de material e conseqüentemente leva à formação de áreas maquinadas aparentemente mais profundas.

A Figura 77 apresenta os resultados do estudo complementar para c10), realizada com potência de 6 W, velocidade de 256 mm/s e 16 passagens.

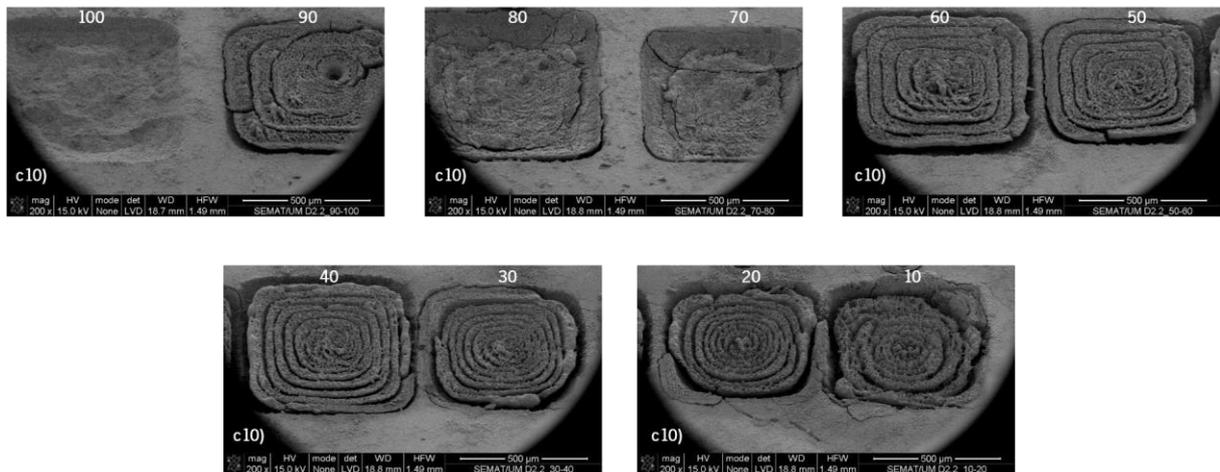
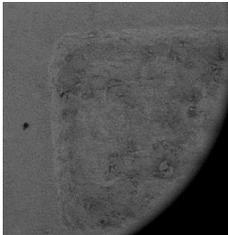
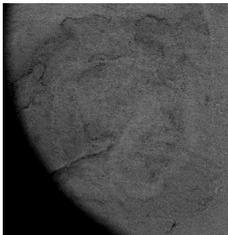
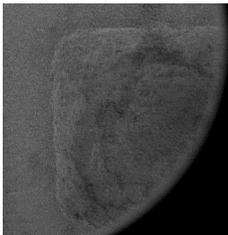
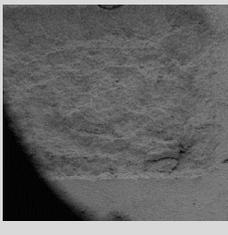
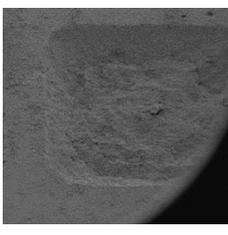


Figura 77: Resultados do estudo complementar: c10)

Comparando esta Figura com a anterior os efeitos são bastante semelhantes, sendo apenas o acabamento superficial significativamente pior.

De seguida, na Tabela 15, é apresentado um quadro resumo com as melhores condições e respectivos resultados do estudo complementar. A sombreado encontra-se a combinação de parâmetros que permitiu obter melhores resultados quanto à maquinação.

Tabela 15: Quadro resumo do estudo complementar (condições e resultados)

Potência (W)	Velocidade de varrimento (mm/s)	Número passagens	Espaçamento entre linhas (mm)	Densidade Energia (J/mm ²)	Resultado
0,75	64	8	0,07	1,34	
1,5	64	8	0,06	3,13	
1,5	64	16	0,09	4,17	
3	128	8	0,08	2,34	
6	128	8	0,07	5,36	

Analisando os valores de densidade de energia para todas as condições testadas, é possível concluir que apenas para valores intermédios de densidade de energia, ou seja entre 2,34 e 5,36 J/mm² é possível a maquinagem de áreas com qualidade e remoção significativa de material. Para densidades de energia superiores a tendência é para que ocorra fusão localizada do cobalto na zona de

atuação do laser, enquanto que para densidade de energia inferiores a remoção de material será nula ou muito pouco significativa, uma vez que a energia não é suficiente para que ocorra remoção de material. A exceção é a condição c1), na qual para valores de energia mais baixos, entre 1 e 2 J/mm^2 , se verificou a ocorrência de remoção de material, no entanto em menor quantidade, pois revelou uma reduzida profundidade.

Utilizando os parâmetros que permitiram obter os melhores resultados no estudo complementar (Tabela 9) foram maquinadas as geometrias determinadas como ótimas no estudo de simulação numérica. A Figura 78 mostra um exemplo de uma amostra maquinada nestas condições.

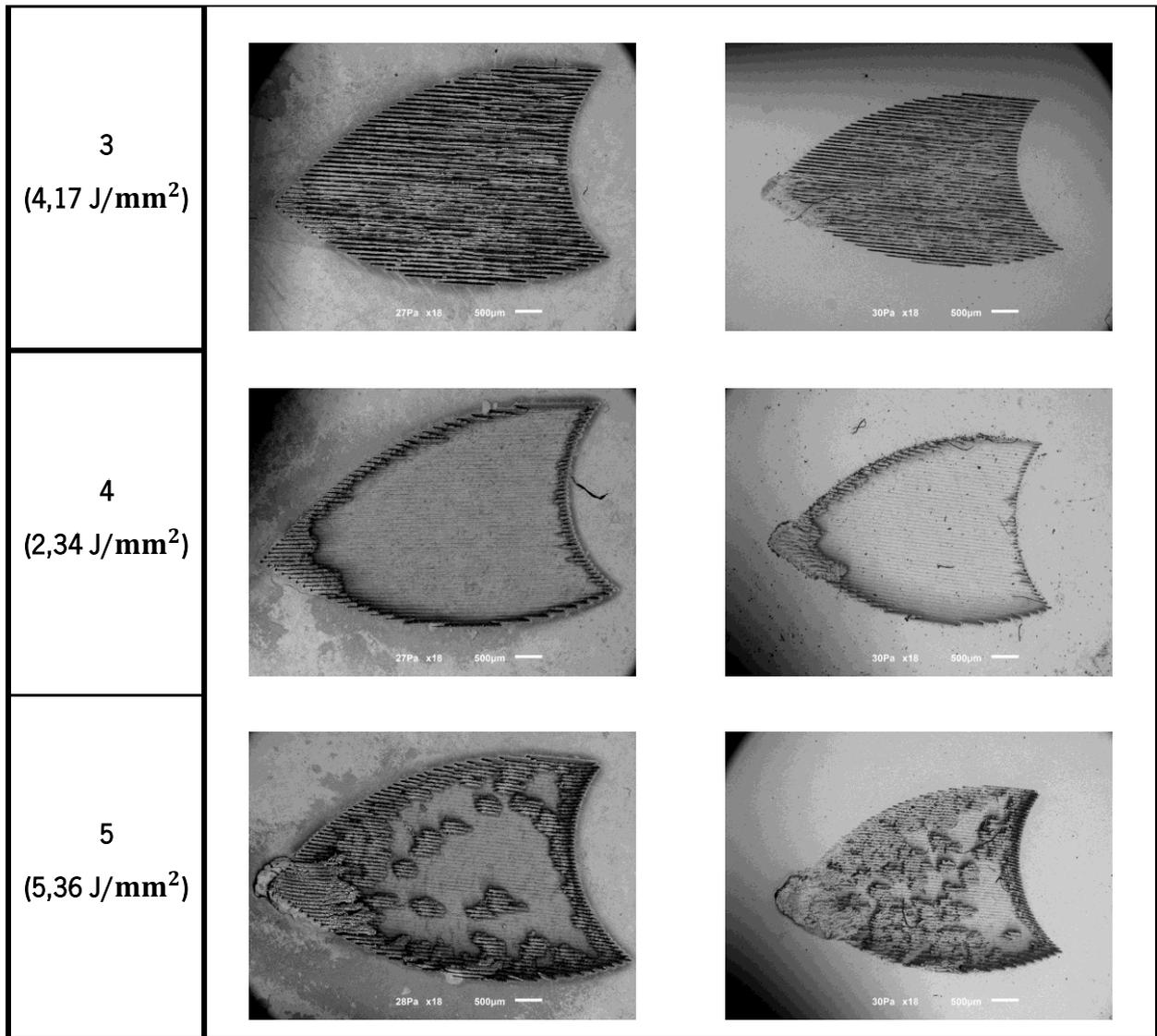


Figura 78: Exemplo de uma amostra com a geometria maquinada a laser

Na Tabela 16 são apresentadas imagens SEM das amostras após maquinagem a verde utilizando diferentes combinações de parâmetros e também imagens SEM após sinterização das mesmas, sendo perceptível a contração das mesmas.

Tabela 16: Imagens SEM das geometrias maquinadas (verde vs sinterizado)

Amostra	Verde	Sinterizada
1 (1,34 J/mm^2)		
2 (3,13 J/mm^2)		



Verifica-se que para as amostras 1 e 3 o espaçamento entre linhas foi demasiado grande (70 e 90 μm , respetivamente), fazendo com que a remoção de material não fosse completa para a área pretendida. Já na amostra 5 aparentemente houve formação de pequenas zonas de fusão localizada do cobalto, concluindo-se assim que a densidade de energia utilizada foi demasiado elevada. As amostras 2 e 4 são as que apresentam resultados mais eficazes. No entanto, na amostra 2 parece ter ocorrido alguma fusão do cobalto, havendo uma maior rugosidade no fundo da cavidade maquinada. Assim sendo, a amostra 4 é a que apresenta melhor qualidade/capacidade para permitir a impregnação com materiais condutores.

Relativamente à contração do material após sinterização, esta foi bastante significativa, ocorrendo uma contração linear de cerca de 18 % e de cerca de 43 % em volume, estando este valor de acordo com o presente na literatura [17,25,26]. Na Figura 79 pode observar-se a diferença de

profundidade do padrão maquinado antes e após sinterização da amostra 4, permitindo verificar que uma profundidade de 778 μm é obtida na amostra sinterizada.

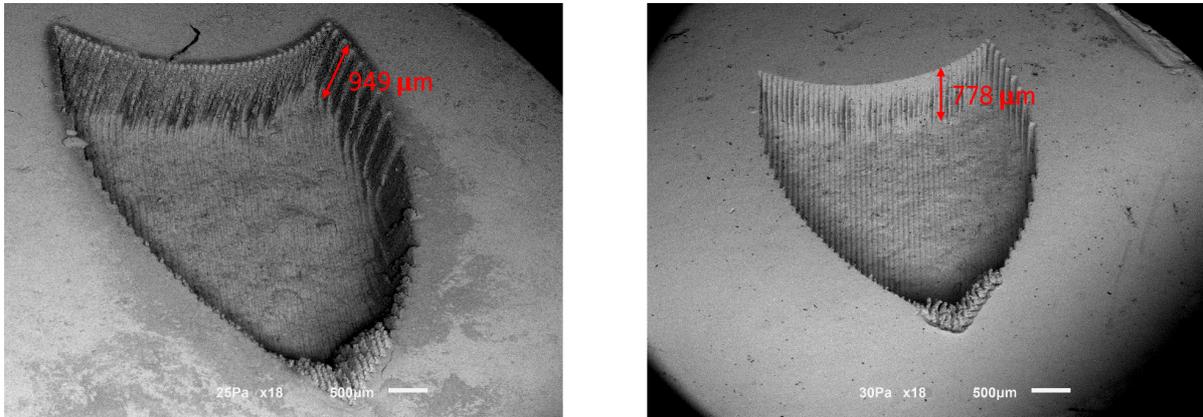


Figura 79: Imagem SEM do padrão maquinado antes e após sinterização para a amostra 4 indicada na Tabela 14

ACABAMENTO

Utilizando os parâmetros da amostra 4, foi realizada uma operação de acabamento nos limites da geometria com e sem aplicação de wobble com amplitude de 7 μm , uma potência de 1,5 W e uma velocidade de 256 mm/s.

A Figura 80 a) e b) apresenta um exemplo do acabamento da geometria maquinada com e sem wobble, respectivamente.

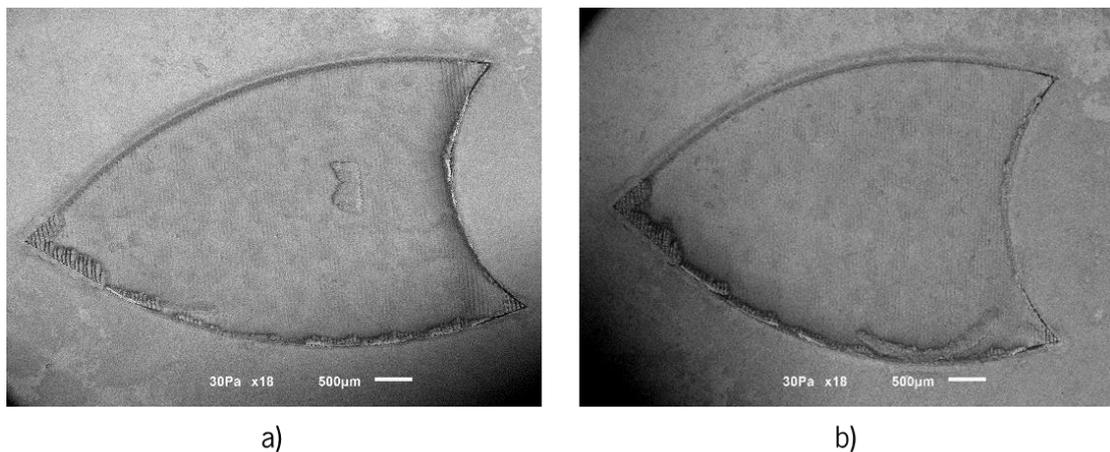


Figura 80: Acabamento da geometria maquinada: a) com wobble; b) sem wobble

Verifica-se que a adição de uma etapa de acabamento melhorou significativamente a qualidade dos limites da geometria. A utilização de wobble permitiu alcançar uma geometria mais precisa e mais próxima da pretendida.

4.3. Impregnação com Materiais Condutores

A geometria maquinada foi preenchida com materiais condutores (Cu, Al), de modo a aumentar a capacidade de extração de calor das ferramentas de corte. Na Figura 81 pode observar-se imagens SEM das amostras de WC-Co após impregnação com cobre.

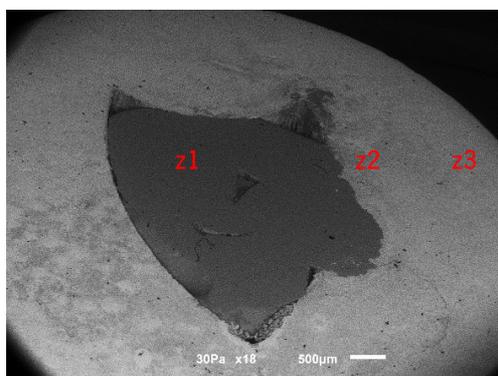


Figura 81: Imagens SEM das amostras de WC-Co impregnadas com cobre

Analisando a Figura anterior verifica-se que a impregnação foi realizada com sucesso, apresentando apenas falhas no preenchimento nos cantos da geometria maquinada, devido ao cobre utilizado se encontrar na forma de grânulos.

De modo, a se puder compreender as possíveis alterações na composição química das amostras devido ao processo de impregnação a composição química foi analisada por EDS em três diferentes zonas (z1, z2 e z3), que se encontram assinaladas a vermelho na Figura 81. Os resultados da composição química das amostras nas zonas analisadas encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17: Composição química (% em peso) das zonas indicadas na Figura 81

Elemento	z1	z2	z3
Cu	95,0	2,5	-
O	1,4	9,8	1,8
W	-	70,7	82,1
C	3,6	5,2	8,7
Co	-	11,8	7,4

Os resultados obtidos evidenciam, como seria de esperar, o elevado teor em cobre na zona z1. A presença de oxigénio evidencia a ocorrência de alguma oxidação.

Na Figura 82 pode observar-se imagens SEM das amostras de WC-Co após impregnação com alumínio.

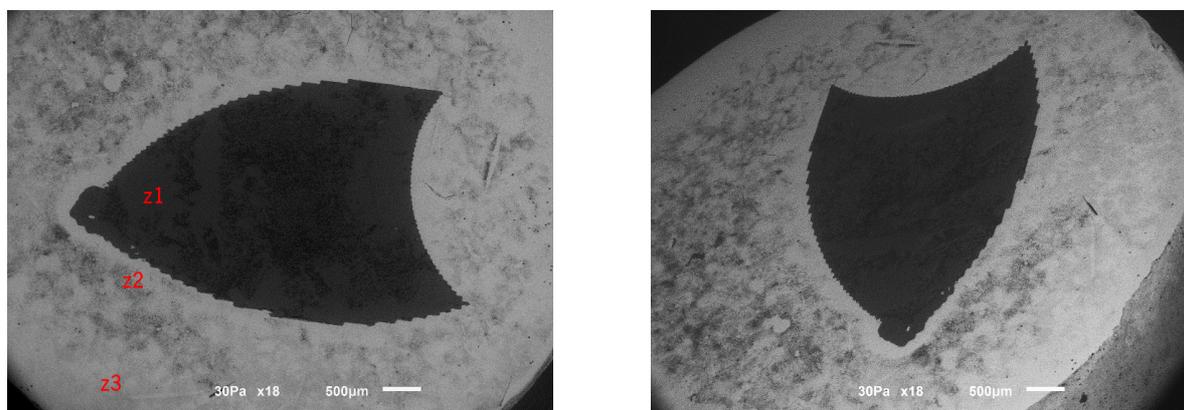


Figura 82: Imagens SEM das amostras de WC-Co impregnadas com alumínio

Verifica-se que a impregnação de alumínio preencheu completamente a geometria maquinada para o efeito, devido à utilização de pós em vez de grânulos à semelhança do cobre. Isto permitiu uma maior compactação, não aparentando a zona impregnada conter porosidade.

À semelhança das amostras impregnadas com cobre, estas também foram analisadas quanto à sua composição química por EDS em três diferentes zonas (z1, z2 e z3), que se encontram assinaladas a vermelho na Figura 82. Os resultados da composição química das amostras nas zonas analisadas encontram-se na Tabela 18.

Tabela 18: Composição química (% em peso) das zonas indicadas na Figura 82

Elemento	z1	z2	z3
Al	81,5	4,0	-
O	6,5	3,4	5,3
W	-	78,2	78,4
C	12,0	7,7	8,1
Co	-	6,7	8,2

Os resultados obtidos evidenciam, como seria de esperar, o elevado teor em alumínio na zona z1. A presença de oxigénio evidencia a ocorrência de alguma oxidação.

No Anexo III encontram-se os espetros EDS para as 3 zonas analisadas de ambos os materiais.

4.4. Resistividade Elétrica

A resistividade elétrica das amostras de WC-Co, WC-Co + Cu e WC-Co + Al, foi medida utilizando o método de quatro pontos, à temperatura ambiente (≈ 25 °C). Na Tabela 19 encontram-se os resultados da resistividade elétrica para as amostras analisadas. Estes valores foram calculados utilizando a Equação 9.

Tabela 19: Resistividade elétrica das amostras

Amostra	Resistividade Elétrica ($\mu\Omega.cm$)
WC-Co	$22,40 \pm 0,80$
WC-Co + Cu	$10,64 \pm 0,33$
WC-Co + Al	$9,75 \pm 0,73$

O valor de resistividade elétrica do metal duro é muito próximo do valor médio de resistividade elétrica reportado para o metal duro de classe convencional ($20 \mu\Omega.cm$) [21,29,68]. A adição de materiais condutores permitiu baixar significativamente a resistividade elétrica do metal duro.

Utilizando a equação de Wiedemann-Franz (Equação 3) e sendo a condutividade elétrica o inverso da resistividade elétrica, é possível calcular o valor da condutividade térmica. Os valores de condutividade térmica obtidos encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20: Condutividade térmica das amostras

Amostra	Condutividade Térmica (W/m K)
WC-Co	32,46
WC-Co + Cu	68,33
WC-Co + Al	74,59

O valor de condutividade térmica do WC-Co é ligeiramente inferior ao valor reportado na literatura [6], devido ao facto de a condutividade térmica ter sido obtida a partir de uma medida da resistividade elétrica, e como na condutividade elétrica, os eletrões são os únicos portadores de carga, ao passo que a condutividade térmica conta com a contribuição de eletrões e fonões como portadores de energia, o valor obtido é ligeiramente inferior [58].

Relativamente aos valores de condutividade térmica para as amostras impregnadas, estes são bastantes superiores resultando num aumento de cerca de 110 % para a amostra impregnada com

cobre e de cerca de 130 % para a amostra impregnada com alumínio. Estes valores resultam do facto de a medição ter sido feita maioritariamente ao nível superficial, zona onde a concentração de materiais condutores é maior.

O valor da condutividade térmica da amostra impregnada com alumínio é maior que a impregnada com cobre, apesar de o cobre ter uma condutividade térmica superior. Isto pode ser justificado pela utilização de grânulos de cobre (enquanto que o alumínio utilizado foi em pó) no processo de impregnação, fazendo com que o preenchimento da cavidade maquinada a laser seja menos eficaz. Estas maiores descontinuidades nas amostras com cobre são possivelmente a causa deste menor valor de condutividade térmica.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo é apresentado um sumário de todas as conclusões obtidas através da realização deste estudo e são dadas sugestões para trabalhos futuros.

5.1. Conclusões

A realização deste estudo permitiu adquirir e compreender um elevado conjunto de conhecimentos relativamente à simulação numérica de ferramentas de corte, à condução de calor em ferramentas de corte e à maquinação a laser de compactos a verde.

Assim, as principais conclusões deste trabalho são as seguintes.

As simulações numéricas permitiram constatar que a adição de materiais condutores pode baixar a temperatura na aresta de corte e que esse abaixamento é tanto maior quanto maior for a quantidade de material condutor adicionado.

Os parâmetros de processamento do laser utilizados na maquinação a verde de compactos de WC-Co, nomeadamente a potência do laser, velocidade de varrimento, número de passagens e espaçamento entre linhas, influenciam a qualidade, acabamento superficial e remoção de material nestes compactos. De uma maneira geral, o aumento do número de passagens e/ou da potência leva à obtenção de rasgos mais profundos, ou seja, a remoção de material é maior e a área termicamente afetada é tanto maior quanto maior for a densidade de energia.

A análise isolada da densidade de energia utilizada em tecnologias laser não é por si só suficiente para ser utilizada como fator determinante. De facto, a mesma densidade de energia, obtida através da combinação de diferentes parâmetros (velocidade, potência, número de passagens, ...) resulta, não raras vezes, em diferentes resultados ou propriedades.

Os canais de escoamento de calor foram maquiados a laser com sucesso, sendo $P = 3 \text{ W}$; $V = 128 \text{ mm/s}$; $N = 8$; $d = 0,08 \text{ mm}$, os melhores parâmetros para a sua maquinação.

A adição de uma etapa de acabamento melhorou significativamente a qualidade nos limites da geometria a preencher com materiais condutores, sendo a utilização de wobble um fator determinante neste melhoramento.

O método de impregnação revelou-se eficaz, com potencial para aplicação, havendo ainda possibilidades de melhoramentos, de modo a tornar o processo mais eficiente e inerte à oxidação.

A adição de cobre resultou, quanto à condutividade térmica num aumento de 110 %, quando comparada com a condutividade do WC-Co convencional e num aumento de 130 % para o alumínio.

5.2. Trabalhos Futuros

Considerando o trabalho desenvolvido durante esta dissertação, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Utilização de pó de cobre (tamanho médio de 45 μm) em alternativa aos grânulos utilizados de modo a melhorar o preenchimento;
- Análise das fases presentes após maquinagem a laser;
- Otimização do processo de impregnação do cobre e alumínio, seja através da melhoria do processo e parâmetros utilizados ou alternativamente usando sinterização assistida por pressão;
- Medição direta da condutividade térmica;
- Medição experimental do perfil de temperatura ao longo da ferramenta de corte;
- Realização de testes de maquinabilidade às pastilhas de corte produzidas, fazendo benchmarking com as ferramentas convencionais produzidas pela PALBIT S.A.;

BIBLIOGRAFIA

- [1] P.P. Kulkarni, M. Channalli, Cutting Edge Nose Radius and Cutting Parameters Effect on Productivity in Turning of Cylinder Liners with Interrupted Area, *Int. J. Sci. Res. Dev.* 3 (2015) 431–434.
- [2] R. Wertheim, A. Layyous, J. Harpaz, Development and Application of New Cutting Tool Materials, *Proc. Conf. Improv. Mach. Tool Performance*, San Sebastian, Spain. (1998) 303–313.
- [3] J. Gurland, New scientific approaches to development of tool materials, *Int. Mater. Rev.* 33 (1988) 151–166.
- [4] R. Batista, *Dissertação do MIEM Tendências do Corte por Arranque de Apara - Maquinagem*, Universidade do Porto, 2010.
- [5] R.C. Kisku, *Modelling of Temperature Profile in Turning With Uncoated and Coated Cemented Carbide Insert*, National Institute of Technology Rourkela, India, 2011.
- [6] R.F. Brito, S.R. de Carvalho, S.M.M. de Lima e Silva, J.R. Ferreira, Thermal analysis in coated cutting tools, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 36 (2009) 314–321.
- [7] Palbit S.A. <http://www.palbit.pt> (accessed July 10, 2018).
- [8] Sandvik Coromant, <https://www.sandvik.coromant.com> (accessed July 11, 2018).
- [9] E.M. Trent, P.K. Wright, Chapter 2 – Metal cutting operations and terminology, in: *Met. Cut.*, Fourth Edi, 2000: pp. 9–20.
- [10] T. Dias, *Otimização dos Parâmetros de Maquinagem no Processo de Fresagem*, Instituto Politécnico de Bragança, 2016.
- [11] Dedalus Consulting, <https://www.dedalusconsulting.com/> (accessed September 25, 2018).
- [12] EPMA, <https://www.epma.com/> (accessed June 6, 2018).
- [13] M. Narasimha, K. Sridhar, R. Reji Kumar, A. Aemro Kassie, Improving Cutting Tool Life a Review, *Int. J. Eng. Res. Dev.* 7 (2013) 2278–67.
- [14] SANDVIK Coromant, *Materials*, 2010.
- [15] E.M. Trent, P.K. Wright, Chapter 6 – Cutting tool materials I: High speed steels, in: *Met. Cut.*, Fouth Edi, 2000: pp. 132–174.
- [16] J.K. Baldock, *Design and fabrication of a new class of cutting tool material using additive manufacturing*, RMIT University, 2016.
- [17] C.S. Torres, L. Schaeffer, Sinterização do compósito metal duro WC-Co, *Rev. Eletrônica Mater. e*

- Process. 43 (2009) 58–63.
- [18] R.K. Enneti, K.C. Prough, T.A. Wolfe, A. Klein, N. Studley, J.L. Trasorras, Sintering of WC-12%Co processed by binder jet 3D printing (BJ3DP) technology, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 71 (2018) 28–35.
- [19] S. Kumar, Manufacturing of WC-Co moulds using SLS machine, *J. Mater. Process. Technol.* 209 (2009) 3840–3848.
- [20] E.M. Trent, P.K. Wright, Chapter 7 – Cutting tool materials II: Cemented carbides, in: *Met. Cut.*, Fourth Edi, 2000: pp. 175–226.
- [21] allaboutcementedcarbide, <http://www.allaboutcementedcarbide.com> (accessed July 17, 2018).
- [22] J.A.M. Ferreira, M.A.P. Amaral, F. V. Antunes, J.D.M. Costa, A study on the mechanical behaviour of WC/Co hardmetals, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 27 (2009) 1–8.
- [23] W.D. Schubert, H. Neumeister, G. Kingler, B. Lux, Hardness to toughness relationship of fine-grained WC-Co hardmetals, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 16 (1998) 133–142.
- [24] R.A. Campos, Estudos da Deposição de Filmes de Diamante CVD sobre Carboneto de Tungstênio, com Interface Controlada de Boreto, 2009.
- [25] G.. Upadhyaya, Materials science of cemented carbides – an overview, *Mater. Des.* 22 (2001) 483–489.
- [26] R.M. German, *Powder Metallurgy Science*, Princeton, 1984.
- [27] M.P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*, Fourth Edi, John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [28] A. Duszová, R. Halgaš, M. Blánda, P. Hvizdoš, F. Lofaj, J. Dusza, J. Morgiel, Nanoindentation of WC-Co hardmetals, *J. Eur. Ceram. Soc.* 33 (2013) 2227–2232.
- [29] Durit, <http://www.durit.com/pt/tecnologia/conhecimento/> (accessed July 17, 2018).
- [30] H.G. Prengel, W.R. Pfouts, A.T. Santhanam, State of the art in hard coatings for carbide cutting tools, *Surf. Coatings Technol.* 102 (1998) 183–190.
- [31] N.A. Abukhshim, P.T. Mativenga, M.A. Sheikh, Heat generation and temperature prediction in metal cutting : A review and implications for high speed machining, 46 (2006) 782–800.
- [32] A.C. a. De Melo, J.C.G. Milan, M.B. Da Silva, Á.R. Machado, Some observations on wear and damages in cemented carbide tools, *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.* 28 (2006) 269–277.
- [33] E.M. Trent, P.K. Wright, Chapter 5 – Heat in metal cutting, in: *Met. Cut.*, 2000: pp. 97–131.
- [34] Y.C. Yen, J. Söhner, B. Lilly, T. Altan, Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the

- finite element analysis, *J. Mater. Process. Technol.* 146 (2004) 82–91.
- [35] B.T. Chao, K.J. Trigger, Temperature distribution at tool-chip and tool-work interface in metal cutting, 1956.
- [36] K. Skotnicová, M. Kurša, I. Szurman, *Powder Metallurgy*, Ostrava, 2014.
- [37] EPMA, <https://www.epma.com/what-is-powder-metallurgy> (accessed May 24, 2018).
- [38] A. Volker, *Powder Metallurgy (PM) for Beginners*, (2017).
- [39] S. Ndlovu, *The Wear Properties of Tungsten Carbide-Cobalt Hardmetals from the Nanoscale up to the Macroscopic Scale*, Erlangen-Nürnberg University, 2009.
- [40] H. Danninger, C. Gierl-Mayer, Advanced powder metallurgy steel alloys, in: *Adv. Powder Metall.*, 2013: pp. 149–201.
- [41] J.C. Ion, Evolution of Laser Material Processing, in: *Laser Process. Eng. Mater.*, 2005: pp. 12–40.
- [42] A.K. Dubey, V. Yadava, Laser beam machining-A review, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 48 (2008) 609–628.
- [43] J.D. Majumdar, I. Manna, Laser processing of materials, *Sadhana.* 28 (2003) 495–562.
- [44] G. Chryssolouris, P. Stavropoulos, K. Salonitis, Process of Laser Machining, in: *Handb. Manuf. Eng. Technol.*, 2013: pp. 1–25.
- [45] M.S. Brown, C.B. Arnold, Chapter 4 - Fundamentals of Laser-Material Interaction and Application to Multiscale Surface Modification, in: *Laser Precis. Microfabr.*, 2010: pp. 91–120.
- [46] A.N. Samant, N.B. Dahotre, Laser machining of structural ceramics-A review, *J. Eur. Ceram. Soc.* 29 (2009) 969–993.
- [47] K.H. Leitz, B. Redlingshöer, Y. Reg, A. Otto, M. Schmidt, Metal ablation with short and ultrashort laser pulses, *Phys. Procedia.* 12 (2011) 230–238.
- [48] M. Hashida, H. Mishima, S. Tokita, S. Sakabe, Non-thermal ablation of expanded polytetrafluoroethylene with an intense femtosecond-pulse laser, *Opt. Express.* 17 (2009) 13116.
- [49] A. Sharma, V. Yadava, Experimental analysis of Nd-YAG laser cutting of sheet materials – A review, *Opt. Laser Technol.* 98 (2018) 264–280.
- [50] B. Su, S. Dhara, L. Wang, Green ceramic machining: A top-down approach for the rapid fabrication of complex-shaped ceramics, *J. Eur. Ceram. Soc.* 28 (2008) 2109–2115.
- [51] M.P. Jahan, M. Rahman, Y.S. Wong, A review on the conventional and micro-electrodischarge

- machining of tungsten carbide, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 51 (2011) 837–858.
- [52] T. El-Wardany, R. Barth, J. Holowczak, W. Tredway, L.J. Chen, Optimum process parameters to produce green ceramic complex parts, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 58 (2009) 109–112.
- [53] J.Z. Li, T. Wu, Z.Y. Yu, L. Zhang, G.Q. Chen, D.M. Guo, Micro machining of pre-sintered ceramic green body, *J. Mater. Process. Technol.* 212 (2012) 571–579.
- [54] S. Mohanty, A.P. Rameshbabu, S. Mandal, B. Su, S. Dhara, Critical issues in near net shape forming via green machining of ceramics: A case study of alumina dental crown, *J. Asian Ceram. Soc.* 1 (2013) 274–281.
- [55] S. Dhara, B. Su, Green machining to net shape alumina ceramics prepared using different processing routes, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 2 (2005) 15–17.
- [56] T. Besshi, T. Sato, I. Tsutsui, Machining of alumina green bodies and their dewaxing, *J. Mater. Process. Technol.* 95 (1999) 133–138.
- [57] J. Yang, J. Yu, Y. Cui, Y. Huang, New laser machining technology of Al₂O₃ ceramic with complex shape, *Ceram. Int.* 38 (2012) 3643–3648.
- [58] W. Callister, *Materials science and engineering: an introduction*, John Wiley & Sons Ltd, 2007.
- [59] S.O. Kasap, *Principles of Electronic Materials and Devices*, Third Edit, McGraw-Hill, 2006.
- [60] EPMA - European Hard Materials Group, *Resistivity of Hardmetals*, 2012.
- [61] A. Kus, Y. Isik, M. Cemal Cakir, S. Coşkun, K. Özdemir, Thermocouple and infrared sensor-based measurement of temperature distribution in metal cutting, *Sensors (Switzerland)*. 15 (2015) 1274–1291.
- [62] S. Shamsuddin, A. Roshan, S. Borazjani, Effect of Cutting Parameters on Tool-Chip Interface Temperature in an Orthogonal Turning Process, *Adv. Mater. Res.* 903 (2014) 21–26.
- [63] S. Kalpakjian, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Fourth Edi, 2003.
- [64] B. Schultrich, W. Poßnecker, Thermal conductivity of cemented carbides, *J. Therm. Anal. Calorim.* 33 (1988) 305–310.
- [65] R.T. Faria, M.F. Rodrigues, I. De Andrade Esquef, H. Vargas, M. Figueira, On the thermal characterization of a HPHT sintered WC-15% wt Co hardmetal alloy, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 23 (2005) 115–118.
- [66] H. Wang, T. Webb, J.W. Bitler, Study of thermal expansion and thermal conductivity of cemented WC-Co composite, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 49 (2015) 170–177.
- [67] W. Neumann, Thermal diffusivity of cemented carbides, *Therm. Conduct.* 18. (1985) 473–481.

- [68] M. V. Frandsen, W.S. Williams, Thermal Conductivity and Electrical Resistivity of Cemented Transition Metal Carbides at Low Temperatures, *J. Am. Ceram. Soc.* 74 (1991) 1411–1416.
- [69] Copper Alliance, <http://copperalliance.org.uk/> (accessed June 11, 2018).
- [70] W.M. Haynes, *Handbook of Chemistry and Physics*, 95th ed., 2014.
- [71] LME, <https://www.lme.com/> (accessed September 24, 2018).
- [72] Bullion Rates, <https://pt.bullion-rates.com/> (accessed September 24, 2018).
- [73] Dream-Composites, <https://www.rdmag.com/article/2006/11/dream-composites> (accessed June 6, 2018).
- [74] P. Vamsi Krishna, R.R. Srikant, D. Nageswara Rao, Experimental investigation on the performance of nanoboric acid suspensions in SAE-40 and coconut oil during turning of AISI 1040 steel, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 50 (2010) 911–916.
- [75] S. Pervaiz, I. Deiab, E.M. Ibrahim, A. Rashid, M. Nicolescu, A coupled FE and CFD approach to predict the cutting tool temperature profile in machining, *Procedia CIRP.* 17 (2014) 750–754.
- [76] L.R. Silva, E.C.S. Corrêa, J.R. Brandão, R.F. de Ávila, Environmentally friendly manufacturing: Behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process, *J. Clean. Prod.* (2013).
- [77] D. Jianxin, S. Wenlong, Z. Hui, Design, fabrication and properties of a self-lubricated tool in dry cutting, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 49 (2009) 66–72.
- [78] K. Cheng, Z.N. Robin, C.W. Richard, R. Bateman, *Smart Cutting Tools and Smart Machining : Development Approaches , and Their Implementation and Application Perspectives*, Chinese J. Mech. Eng. (2017).
- [79] G. Byrne, E. Scholta, *Environmentally Clean Machining Processes - A Strategic Approach*, 42 (1993) 471–474.
- [80] S. PalDey, S.C. Deevi, Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: A review, *Mater. Sci. Eng. A.* 342 (2003) 58–79.
- [81] K. Ramachandran, B. Yeesvaran, K. Kadirgama, D. Ramasamy, S.A. Che Ghani, K. Anamalai, State of art of cooling method for dry machining, *MATEC Web Conf.* 90 (2017) 01015.
- [82] A. Shokrani, V. Dhokia, S.T. Newman, Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 57 (2012) 83–101.
- [83] X. Sun, R. Bateman, K. Cheng, S.C. Ghani, Design and analysis of an internally cooled smart cutting tool for dry cutting, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* 226 (2012) 585–591.
- [84] Y. Isik, Using internally cooled cutting tools in the machining of difficult-to-cut materials based on

- Waspaloy, Adv. Mech. Eng. 8 (2016) 1–8.
- [85] V. Sharma, P.M. Pandey, Recent advances in turning with textured cutting tools : A review, J. Clean. Prod. 137 (2016) 701–715.
- [86] Software SolidWorks, (2016).
- [87] W. Zhou, R.P. Apkarian, Z.L. Wang, Fundamentals of Scanning Electron Microscopy, in: Scanning Microsc. Nanotechnol., 2007: pp. 1–40.
- [88] B.A. Dedavid, C.I. Gomes, G. Machado, MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - Aplicações e preparação de amostras - Materiais Poliméricos, metálicos e semicondutores, 2007.
- [89] J. Health, Energy Dispersive Spectroscopy, Second Edi, John Wiley & Sons Ltd, 2015.
- [90] B.D. Cullity, Elements of X-ray diffraction, Second Edi, Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1978.
- [91] H. Kahn, Difração de raios-X, 2008.
- [92] Y. SINGH, Electrical Resistivity Measurements: a Review, Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 22 (2013) 745–756.
- [93] M.B. Heaney, Electrical Conductivity and Resistivity, Electr. Meas. Signal Process. Displays. (2004).
- [94] G. Miranda, S. Faria, F. Bartolomeu, E. Pinto, S. Madeira, A. Mateus, P. Carreira, N. Alves, F.S. Silva, O. Carvalho, Predictive models for physical and mechanical properties of 316L stainless steel produced by selective laser melting, Mater. Sci. Eng. A. 657 (2016) 43–56.
- [95] F. Bartolomeu, S. Faria, O. Carvalho, E. Pinto, N. Alves, F.S. Silva, G. Miranda, Predictive models for physical and mechanical properties of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting, Mater. Sci. Eng. A. 663 (2016) 181–192.

ANEXOS

Neste capítulo são apresentados os valores de densidade de energia do estudo complementar (Anexo I), as simulações numéricas utilizando variações do design f1) (Anexo II), assim como os espectros EDS das amostras impregnadas com cobre e alumínio (Anexo III).

ANEXO I – DENSIDADE DE ENERGIA DO ESTUDO COMPLEMENTAR

Experiência	Potência (W)	Velocidade de varrimento (mm/s)	Número de passagens	Espaçamento entre linhas (mm)	Densidade de energia (J/mm ²)
c1)	0,75	64	8	0,01	9,38
				0,02	4,69
				0,03	3,13
				0,04	2,34
				0,05	1,88
				0,06	1,56
				0,07	1,34
				0,08	1,17
				0,09	1,04
				0,1	0,94

Experiência	Potência (W)	Velocidade de varrimento (mm/s)	Número de passagens	Espaçamento entre linhas (mm)	Densidade de energia (J/mm ²)
c2)	0,75	64	16	0,01	18,75
				0,02	9,38
				0,03	6,25
				0,04	4,69
				0,05	3,75
				0,06	3,13
				0,07	2,68
				0,08	2,34
				0,09	2,08
				0,1	1,88

Experiência	Potência (W)	Velocidade de varrimento (mm/s)	Número de passagens	Espaçamento entre linhas (mm)	Densidade de energia (J/mm ²)
c3)	1,5	64	8	0,01	18,75
				0,02	9,38
				0,03	6,25
				0,04	4,69
				0,05	3,75
				0,06	3,13
				0,07	2,68
				0,08	2,34
				0,09	2,08
				0,1	1,88

Experiência	Potência (W)	Velocidade de varrimento (mm/s)	Número de passagens	Espaçamento entre linhas (mm)	Densidade de energia (J/mm ²)
c4)	1,5	64	16	0,01	37,50
				0,02	18,75
				0,03	12,50
				0,04	9,38
				0,05	7,50
				0,06	6,25
				0,07	5,36
				0,08	4,69
				0,09	4,17
				0,1	3,75

Experiência	Potência (W)	Velocidade de varrimento (mm/s)	Número de passagens	Espaçamento entre linhas (mm)	Densidade de energia (J/mm ²)
c5)	0,75	128	16	0,01	9,38
				0,02	4,69
				0,03	3,13
				0,04	2,34
				0,05	1,88
				0,06	1,56
				0,07	1,34
				0,08	1,17
				0,09	1,04
				0,1	0,94

Experiência	Potência (W)	Velocidade de varrimento (mm/s)	Número de passagens	Espaçamento entre linhas (mm)	Densidade de energia (J/mm ²)
c6)	1,5	128	16	0,01	18,75
				0,02	9,38
				0,03	6,25
				0,04	4,69
				0,05	3,75
				0,06	3,13
				0,07	2,68
				0,08	2,34
				0,09	2,08
				0,1	1,88

Experiência	Potência (W)	Velocidade de varrimento (mm/s)	Número de passagens	Espaçamento entre linhas (mm)	Densidade de energia (J/mm ²)
c7)	3	128	8	0,01	18,75
				0,02	9,38
				0,03	6,35
				0,04	4,69
				0,05	3,75
				0,06	3,13
				0,07	2,68
				0,08	2,34
				0,09	2,08
				0,1	1,88

Experiência	Potência (W)	Velocidade de varrimento (mm/s)	Número de passagens	Espaçamento entre linhas (mm)	Densidade de energia (J/mm ²)
c8)	3	128	16	0,01	37,50
				0,02	18,75
				0,03	12,50
				0,04	9,38
				0,05	7,50
				0,06	6,25
				0,07	5,38
				0,08	4,69
				0,09	4,17
				0,1	3,75

Experiência	Potência (W)	Velocidade de varrimento (mm/s)	Número de passagens	Espaçamento entre linhas (mm)	Densidade de energia (J/mm ²)
c9)	6	128	8	0,01	37,50
				0,02	18,75
				0,03	12,50
				0,04	9,38
				0,05	7,50
				0,06	6,25
				0,07	5,36
				0,08	4,69
				0,09	4,17
				0,1	3,75

Experiência	Potência (W)	Velocidade de varrimento (mm/s)	Número de passagens	Espaçamento entre linhas (mm)	Densidade de energia (J/mm ²)
c10)	6	256	16	0,01	37,5
				0,02	18,75
				0,03	12,50
				0,04	9,38
				0,05	7,50
				0,06	6,25
				0,07	5,36
				0,08	4,69
				0,09	4,17
				0,1	3,75

ANEXO II – VARIAÇÕES DO DESIGN F1)

Numa tentativa de baixar ainda mais a temperatura na aresta de corte foram feitas algumas variações do design f1) que consistiram no aumento da profundidade dos canais (f2), colocação dos canais mais perto da aresta de corte (f4), utilização de um declive (f3) e ainda colocação de um coletor (f5), ver Figura 83. Na Figura 84 encontram-se o resultados dos designs finais testados.

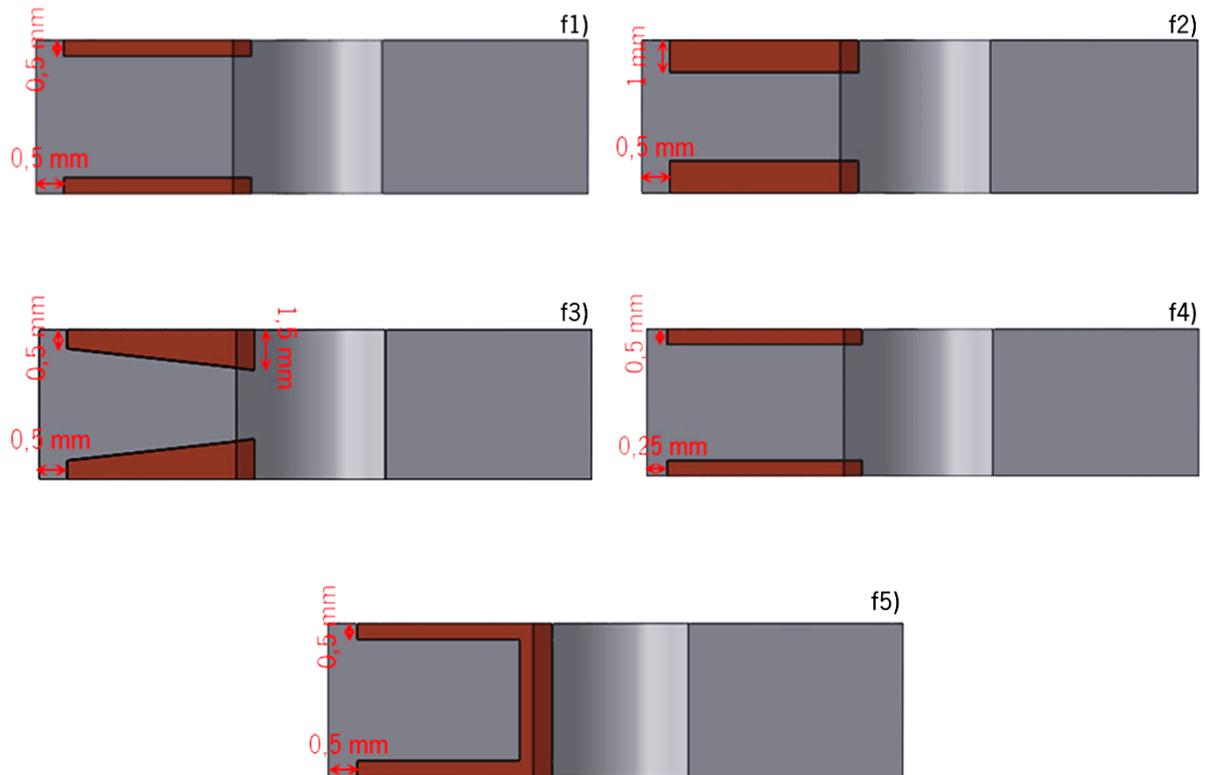


Figura 83: Variações do design f1)

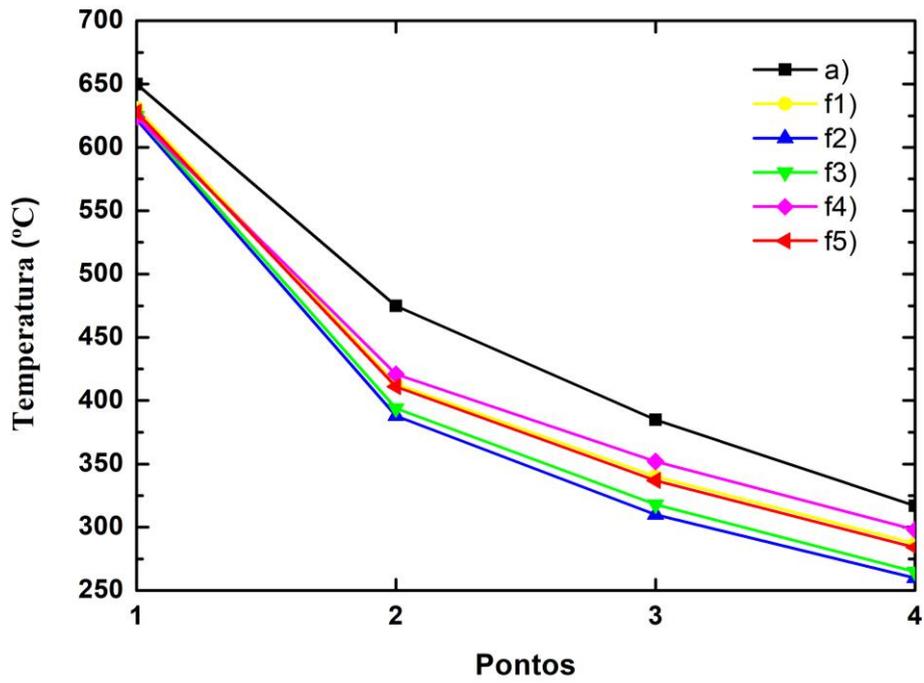


Figura 84: Resultados das simulações numéricas utilizando variações do design f1)

Mais uma vez verifica-se que aumentando o volume de material condutor térmico aumenta a capacidade de extração de calor.

ANEXO III – ESPETROS EDS

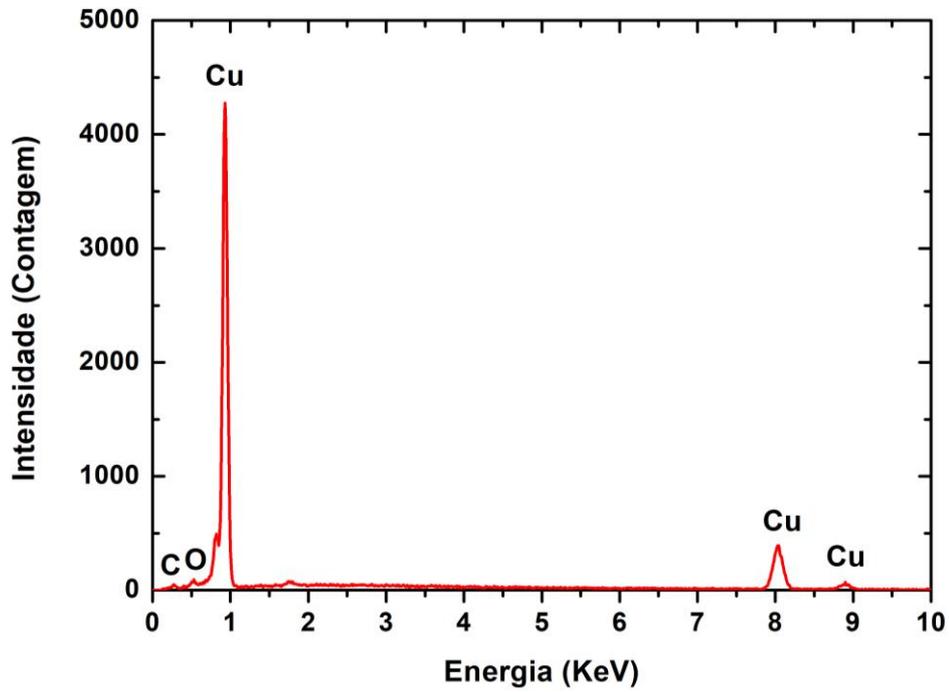


Figura 85: Espectro EDS de z1 da amostra impregnada com cobre

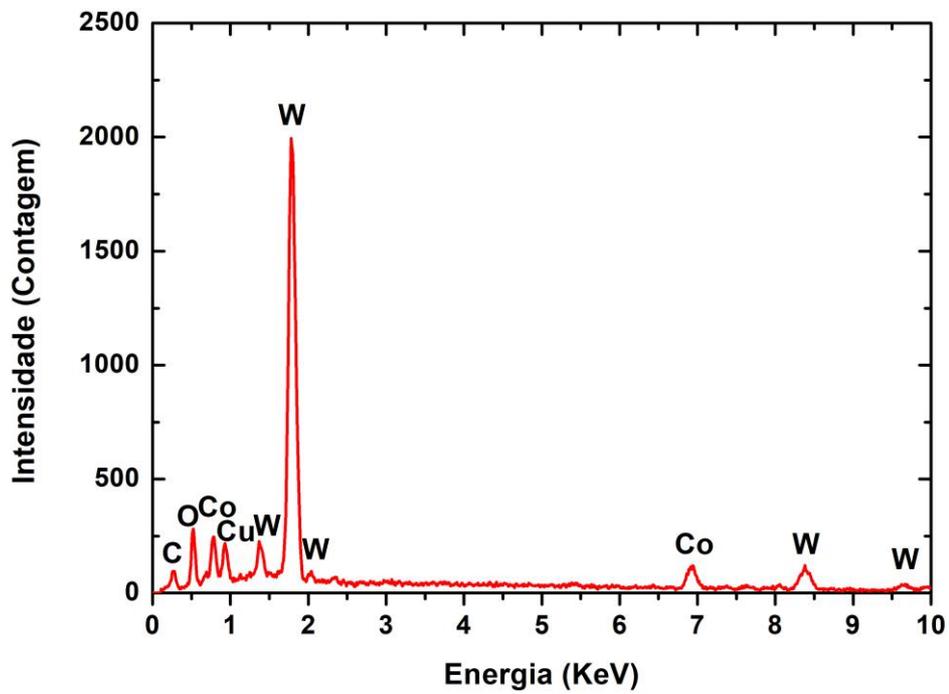


Figura 86: Espectro EDS de z2 da amostra impregnada com cobre

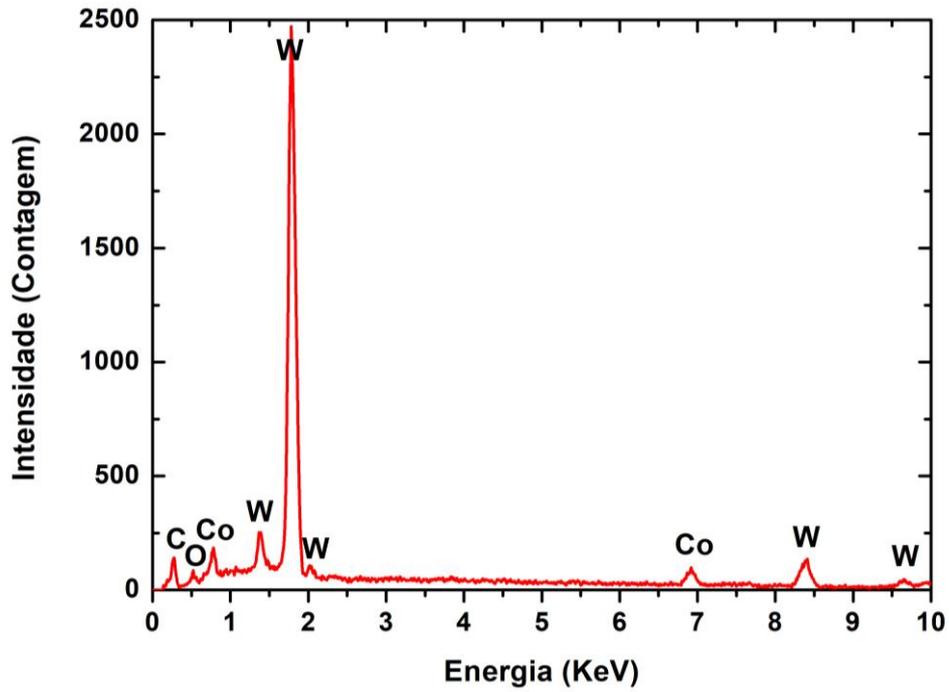


Figura 87: Espectro EDS de z3 da amostra impregnada com cobre

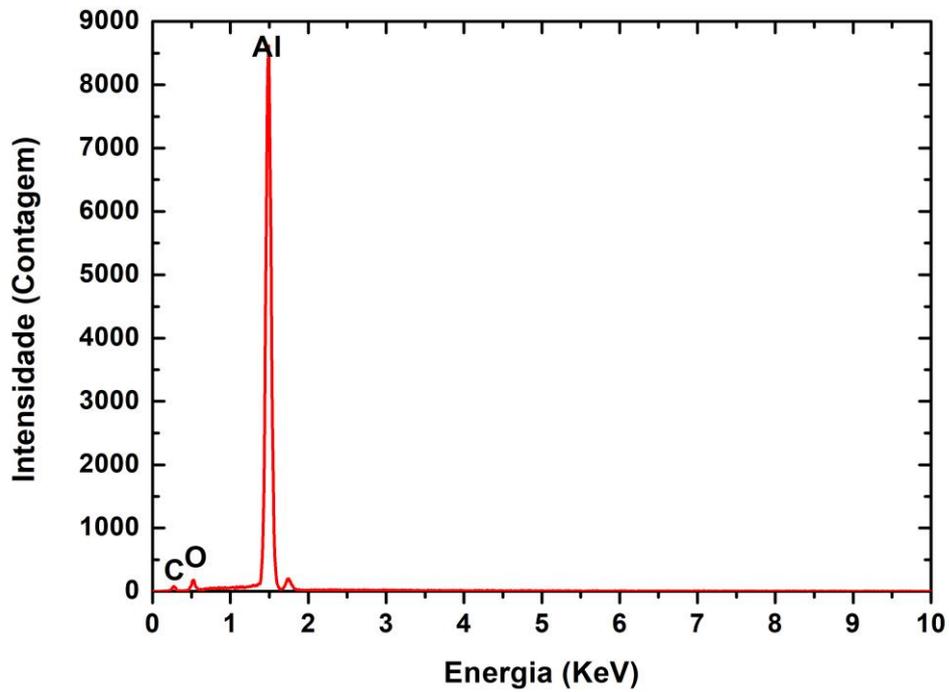


Figura 88: Espectro EDS de z1 da amostra impregnada com alumínio

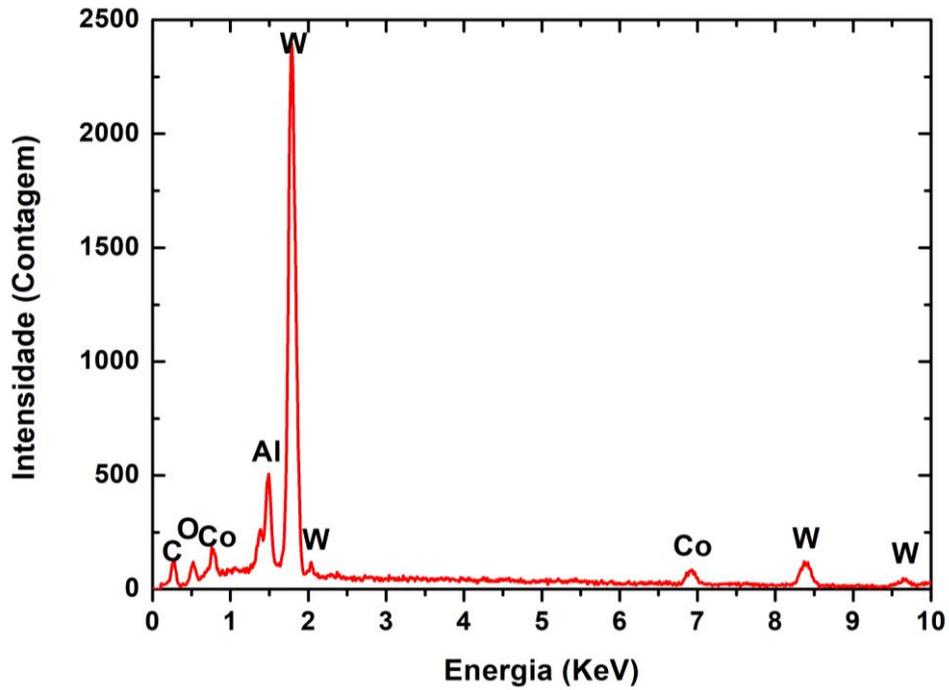


Figura 89: Espectro EDS de z2 da amostra impregnada com alumínio

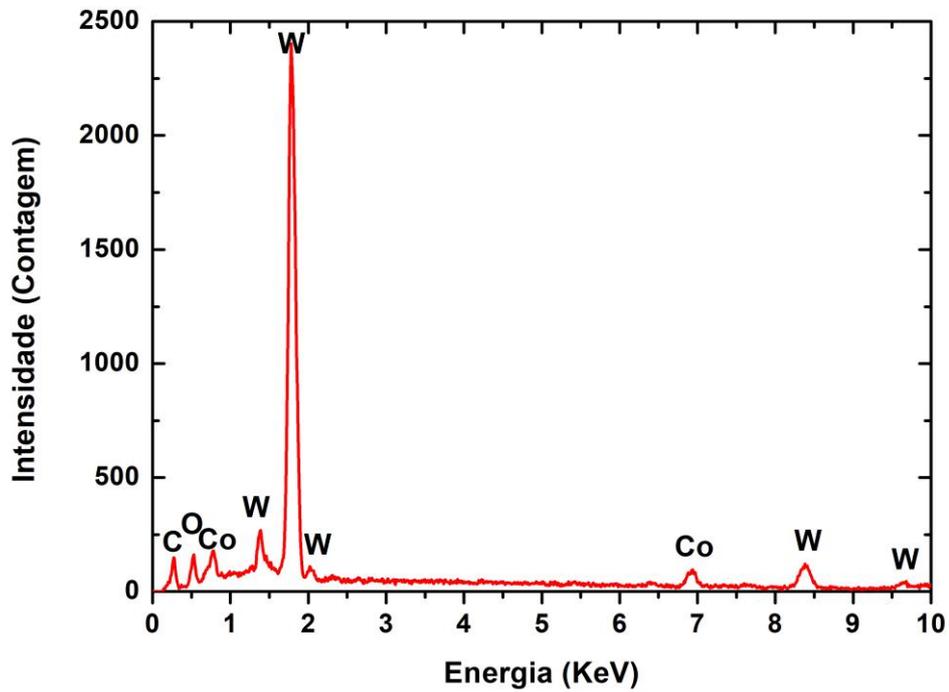


Figura 90: Espectro EDS de z3 da amostra impregnada com alumínio