

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Joel Oliveira Correia Vasco
**A Micro-Fabricação aplicada ao processo de
Micro-Injecção**

Tese de Mestrado
Mestrado em Projecto e Fabrico de Moldes

Trabalho efectuado sob a orientação do
Doutor António Augusto Magalhães Cunha
Doutor Paulo Jorge da Silva Bártolo

Março de 2006



Agradecimentos

Ao Doutor António Cunha, meu orientador científico e ao Doutor Paulo Bártolo, meu co-orientador científico, pelos conhecimentos valiosos e experiência que me disponibilizaram, pela sua disponibilidade e orientação colocadas nesta dissertação.

Ao Instituto Politécnico de Leiria, em particular, à Escola Superior de Tecnologia e Gestão pela criação das condições necessárias para a realização desta dissertação, pela disponibilidade demonstrada na aquisição de equipamento e pela cedência da unidade de injeção D80, das sondas de pressão/temperatura Kistler 6190A, da câmara termográfica ThermaCAM PM575 e do rugosímetro Mahr Marsurf M2.

Aos Engenheiros Bruno Silva e Carlos Galo da Hasco Portuguesa – Marinha Grande, pela sua disponibilidade e colaboração na realização de todos os testes de *Laser Milling*, na realização das zonas moldantes e pela vontade de explorar novos caminhos.

Ao *Dipl. Eng.* Frank Rehmus da Foba GmbH – Alemanha, pela cedência dos dados experimentais relativos à potência do laser e pelo acompanhamento realizado a todos os testes.

Ao Engenheiro José Frazão e ao Senhor Pedro Cortez da Plasdan, S.A. – Marinha Grande, pela disponibilidade demonstrada e pela cooperação na cedência de equipamento de co-injeção EL27 para a realização dos testes.

Ao Engenheiro João Paulo da Cadflow, Lda. – Marinha Grande, pela disponibilidade demonstrada e pela cooperação na cedência de equipamento para a aquisição de sinal (Kistler) e monitorização das condições de processamento durante os testes de injeção.

Ao Engenheiro Luís Miguel Oliveira da Farmi, Lda. – Marinha Grande, pela sua paciência nas inúmeras alterações efectuadas ao projecto do molde no decurso desta dissertação.



Aos meus colegas do outro lado do Atlântico, Suzimara Andrade, André Jardini e Rodrigo Resende, da Universidade de Campinas, Brasil, por toda a colaboração prestada na obtenção duma solução para a modelação em Ansys do varrimento laser.

Aos meus colegas de departamento que sempre se mostraram disponíveis para ajudar, Irene Ferreira, António Selada, Fernando Romeiro, Rui Rúben e cuja contribuição para a realização e concretização deste trabalho foi inestimável.

Quero também agradecer a alguém muito especial... que surgiu na minha vida e a transformou em algo melhor e que sempre me encorajou a continuar, a fazer mais, a fazer mais e melhor.

Por fim mas definitivamente não por último... uma palavra de enorme apreço à minha família e aos meus amigos em geral, que tiveram de suportar as minhas indisposições mas que sempre acreditaram e nunca deixaram de me encorajar.



Resumo

A miniaturização de componentes e sistemas incorporados nos mais diversos ramos de indústria, aplicações médicas e domésticas tem vindo a ser uma realidade nas duas últimas décadas. A evolução constante de técnicas de micro-fabricação e de materiais tem criado novas aplicações, mais complexas, mais eficazes e mais ambiciosas no que toca à visão do futuro. A massificação destes mini, micro e nanosistemas depende fortemente da capacidade de replicação dos seus componentes.

Esta tese de Mestrado discute a aplicabilidade das técnicas de micro-fabricação existentes actualmente aos processos de micro-replicação. Com esse objectivo presente, é feita uma análise ao estado da arte dos processos de micro-fabricação e a sua classificação quanto à sua aptidão de produzirem directamente ferramentas para replicação.

Uma vez seleccionado um componente para os testes de produção em série, são avaliadas as suas necessidades e escolhido um processo de micro-fabricação, sendo este utilizado para produzir uma ferramenta para o processo de micro-injecção.

As limitações técnicas que alguns processos de micro-fabricação possuem actualmente justificam a necessidade de uma análise comparativa entre aquilo que é possível realizar e o seu custo, de modo a privilegiar a componente produtiva do processo.



Abstract

The miniaturisation of components and systems integrated into many types of industries, medical and domestic applications has become a reality in the last two decades. The constant evolution of micro-fabrication techniques and materials has been creating new fields of applications, more complex, more effective and more ambitious in which concerns to a vision of the future. The massification of these mini, micro and nanosystems strongly depends on the capacity of replicating their components.

This Master thesis discusses the applicability of the existing micro-fabrication techniques to replication processes. With that objective in mind, an analysis is made to the state-of-the-art micro-fabrication processes and these are classified on their ability to directly produce tools for replication.

Then, once selected a component for replication tests, its technical needs are evaluated and a micro-fabrication process is chosen and afterwards, used to produce a tool for the micro-injection process.

The technical limitations that some micro-fabrication processes possess nowadays justify the need for a comparison between what is possible to accomplish and its cost, so the productive component of the process can be privileged.



Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract	iv
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	x
Índice de Figuras	xii
Índice de Tabelas	xix
1. Introdução.....	1
1.1. As Micro e as Nanotecnologias.....	1
1.2. A indústria de Moldes e as Micro-Tecnologias	2
1.3. Conteúdo da Dissertação	4
2. Micro-Fabricação: Estado da Arte	6
2.1. Introdução.....	6
2.2. Processos de Produção de Micro-componentes em Série	7
2.2.1. Micro-Injecção.....	8
2.2.2. Micro-Gravação a Quente.....	11
2.3. Processos de Micro-Fabricação	14
2.3.1. Classificação dos Processos quanto à técnica utilizada.....	14
2.3.2. Classificação dos Processos quanto à utilização dos seus produtos.....	15
2.4. Processos Directos.....	17
2.4.1. Processo LIGA Raio-X.....	17
2.4.2. Processo LIGA – UV	25
2.4.3. Processo LIGA – Feixe de lões (LIGAIB).....	27
2.4.4. Processo LIGA-Laser.....	29
2.4.5. Laser Milling	29
2.4.6. Gravação por Feixe de lões	31
2.4.7. Micro-Sinterização Laser	34
2.4.8. Micro-Fresagem	38
2.4.9. Micro-Torneamento	39



2.4.10. Micro-Furação.....	40
2.4.11. Micro-EDM.....	41
2.4.12. Micro-WEDM.....	44
2.5. Processos Indirectos.....	46
2.5.1. Gravação por Radiação Directa do Sincrotrão	46
2.5.2. Ablação Laser	47
2.5.3. Micro-estereolitografia.....	48
2.5.4. Fotopolimerização Bi-Fotónica	51
2.6. Processos Híbridos.....	55
2.6.1. Processo UPSAMS	55
2.7. Análise comparativa entre Processos de Micro-Fabricação.....	58
2.7.1. Critérios de Selecção dos Processos de Fabricação.....	61
2.7.2. Custos Estimados dos Processos de Produção em Série	65
2.8. A Micro-Fabricação no Mundo	66
2.9. Referências.....	69
3. Selecção do processo de Micro-Fabricação.....	72
3.1. Avaliação das necessidades	72
3.2. Avaliação da disponibilidade.....	73
3.3. <i>Laser Milling</i> : Caracterização do processo.....	75
3.3.1. Princípio da Remoção de Material por Laser.....	75
3.3.2. Principais vantagens e desvantagens do processo <i>Laser Milling</i>	76
3.3.3. Equipamentos.....	78
3.3.4. Operação do Equipamento.....	78
3.3.5. Verticalidade das paredes laterais.....	82
3.4. <i>Laser Milling versus</i> Electroerosão por Penetração.....	84
3.5. Evoluções futuras.....	86
3.5.1. Densidade de Potência	86
3.5.2. Comprimento de Onda	86
3.5.3. Processos inovadores	87
3.6. Conclusões.....	89



3.7. Referências.....	90
4. Molde para trabalho experimental.....	91
4.1. Componente a produzir	91
4.2. Equipamento	92
4.2.1. Instrumentação.....	92
4.2.2. Equipamento de Injecção.....	94
4.3. Projecto do Molde	96
4.3.1. Alimentação.....	97
4.3.2. Cavidades.....	99
4.3.3. Controlo de Temperatura.....	100
4.3.4. Escape de Gases.....	106
4.3.5. Centragem / Guiamento.....	106
4.3.6. Extracção.....	107
4.4. Estrutura do Molde.....	108
4.5. Montagem da Unidade de Injecção.....	110
4.6. Referências.....	113
5. Resultados Experimentais – Micro-Fabricação	114
5.1. Introdução.....	114
5.2. Acabamento versus Remoção de Material.....	114
5.2.1. Avaliação da Rugosidade.....	115
5.3. Micro-maquinação das impressões	134
5.4. Áreas Termicamente Afectadas	135
5.4.1. Análise Termográfica.....	135
5.4.2. Análise Térmica no software Ansys	137
5.5. Referências.....	144
6. Resultados Experimentais – Micro-Injecção	145
6.1. Montagem dos equipamentos utilizados.....	145
6.2. Testes de Injecção.....	147
6.2.1. Parâmetros de Injecção.....	148
6.2.2. Provetes.....	152



7. Conclusões e trabalhos futuros	154
Anexo A1 Lasers Nd:YAG	158
A1.1. Introdução	158
A1.2. Características do Laser Nd:YAG	159
A1.2.1. Constituição	159
A1.2.2. Modo de Funcionamento	159
A1.2.3. Parâmetros de Operação	161
A1.2.4. Diâmetro do feixe laser	161
A1.2.5. Material processado	162
A1.2.6. Profundidade de penetração térmica	163
A1.2.7. Q-Switch	164
A1.3. Referências	166
Anexo A2 Rugosidade	167
A2.1. Introdução	167
A2.2. R_a , Rugosidade Média	169
A2.3. R_{max} , Altura máxima entre picos e vales	169
A2.4. R_z , Média das alturas máximas entre picos e vales	170
A2.4.1. $R_{z(DIN)}$, segundo a norma DIN 4768	170
A2.4.2. $R_{z(ISO)}$, segundo a norma ISO 4287	171
A2.4.3. $R_{z(DIN)}$, $R_{z(ISO)}$ e R_{max}	171
A2.5. R_k , Rugosidade Estatística	172
A2.6. Equipamento utilizado	174
A2.7. Análise dos parâmetros de rugosidade abordados	175
A2.7.1. R_a versus outros parâmetros	175
A2.7.2. R_{max} versus outros parâmetros	176
A2.7.3. $R_{z(DIN)}$ versus outros parâmetros	176
A2.7.4. R_{max} e $R_{z(DIN)}$ versus outros parâmetros	176
A2.7.5. $R_{z(ISO)}$ versus outros parâmetros	177
A2.7.6. R_k versus outros parâmetros	177
A2.8. Conclusão	178



A2.9. Referências.....	179
Anexo A3 Ansys – <i>Input Files</i> utilizados.....	180
A3.1. Algoritmo.....	180
A3.2. Listagens.....	181
A3.3. Referências.....	183



Lista de Abreviaturas e Siglas

2 ¹ / ₂ D	Geometria tridimensional obtida por geratriz
3D	Geometria tridimensional livre
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)
AHP	Analytical Hierarchy Process
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
COC	Cyclic Olefin Copolymer (Copolímero Olefino Cíclico)
DNA	Digital Network Architecture
DPSSL	Diode Pumped Solid State Laser
EDM	Electric Discharge Machining
ESTG Leiria	Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria
UE	União Europeia
EUA	Estados Unidos da América
FEP	FluoroEthylene Polymer
FIB	Focused Ion Beam
FPSSL	Flash-lamp Pumped Solid State Laser
HAZ	Heat Affected Zones
HDPE	High Density Polyethylene (Polietileno de Alta Densidade)
HPEA	Hyperbranched PolyEster Acrylate
IB	Ion Beam
IBM	International Business Machine
ISO	International Standards Organization
LCP	Liquid Crystal Polymer (Polímero Líquido Cristalino)
LIGA	Lithographie Galvanik Abforming
M ² DXL	Moving Deep X-Ray Lithography
MEMS	Micro Electronic Mechanical Systems
Nd:YAG	Neodymium-doped Yttrium-Aluminum Garnet
ORMOCER [®]	ORganic MOdified CERamic



PA	Polyamide (Poliamida, vulgo Nylon)
PAI	Polyamide-Imide (Poliamida-Imida)
PBT	Polybutylene Terephthalate (Poli-Tereftalato de Butileno)
PC	Polycarbonate (Policarbonato)
PEEK	Polyetheretherketone (Poliéter-éter Cetona)
PEI	Polyetherimide (Poliéterimida)
PFA	Perfluoroalkoxy
PME	Pequena e Média Empresa
PMMA	Polymethymethacrylate (Poli-Metacrilato de Metilo)
POM	Polyoxymethylene (Poli-Óxido de Metileno ou Acetal)
PP	Polypropylene (Polipropileno)
PPE	Polyphenylene Ether (Poli-Éter de Fenileno)
PS	Polystyrene (Poliestireno)
PSU	Polysulfone (Polisulfonas)
PTFE	Polytetrafluoroethylene (Poli-Tetrafluoroetileno, vulgo Teflon)
PVDF	Polyvinilidene Fluoride (Fluoreto de Polivinilideno)
R_A	Average Roughness
R_K	Core Roughness Depth
R_{MAX}	Maximum peak-to-valley Height
R_z	Mean peak-to-valley Height
SEM	Scanning Electron Microscope
SLS	Selective Laser Sintering
STL	STereoLitography format
T_G	Temperatura de transição vítrea
UPSAMS	UltraPrecision Manufacturing of Self Assembled Micro Systems
UV	Ultra-Violeta
WEDM	Wire-Electric Discharge Machining



Índice de Figuras

Figura 1.1 – Evolução no tempo em função das quantidades produzidas para as diferentes tecnologias normalmente associadas à miniaturização de componentes e sistemas.	1
Figura 2.1 – Arburg Allrounder 170U.....	8
Figura 2.2 – Rondol High Force 5.....	8
Figura 2.3 – Battenfeld Microsystem 50.....	9
Figura 2.4 – Detalhe do sistema de doseamento e da alimentação da Battenfeld Microsystem 50.....	9
Figura 2.5 – Diagrama esquemático do processo de Micro-Gravação a Quente.....	11
Figura 2.6 – Jenoptik Mikrotechnik HEX 01.....	12
Figura 2.7 – EVG 250HE.....	12
Figura 2.8 – Classificação dos processos de micro-fabricação quanto à técnica utilizada.....	14
Figura 2.9 – Classificação dos processos de micro-fabricação em função da utilização dos seus produtos em processos de produção de micro-componentes em série subsequentes.	15
Figura 2.10 – Razão de aspecto.....	16
Figura 2.11 – Fases do processo LIGA Raio-X.....	18
Figura 2.12 – Mecanismos de degradação e cura nos materiais suporte dos processos LIGA ..	19
Figura 2.13 – Tipos de máscaras utilizadas em função do tipo de material suporte.....	20
Figura 2.14 – Técnica avançada de exposição aos raios-X M ² DXL no processo LIGA (Tabata, 2001).....	23
Figura 2.15 – Técnica avançada de Dupla Exposição aos raios-X no processo LIGA (Tabata, 2001).....	24
Figura 2.16 – Fases do processo LIGA-UV.....	26
Figura 2.17 – Esquema representativo do processamento por lasers de baixa frequência e os efeitos adversos causados [16].	30
Figura 2.18 – Micrografia de Aço 1.2311 processado por Laser Milling [17].....	30
Figura 2.19 – Processamento por Laser Milling [17].....	31
Figura 2.20 – Representação esquemática de uma coluna de iões para o processo de gravação [18].....	32



Figura 2.21 – Exemplo de Gravação por Feixe de lões [19]	34
Figura 2.22 – Exemplo de Gravação por Feixe de lões auxiliado por gás [19].....	34
Figura 2.23 – Equipamento de Micro-Sinterização por Laser [23]	35
Figura 2.24 – Detalhe de operação da plataforma de processamento [22]	35
Figura 2.25 – Diagrama esquemático do processo de Micro-Sinterização por Laser [22]	35
Figura 2.26 – Componente tridimensional [22]	37
Figura 2.27 – Estrutura em hélice dupla para ilustrar a capacidade de construção sem necessidade de suportes [22]	37
Figura 2.28 – Componente utilizado para os testes de micro-injecção [23].....	37
Figura 2.29 – Micro-fresa de 4 arestas de corte [24]	38
Figura 2.30 – Micro-fresa de 2 arestas de corte [24]	38
Figura 2.31 – Micro-Torno [25]	39
Figura 2.32 – Torneamento de contorno [25].....	40
Figura 2.33 – Abertura de rasgos [25].....	40
Figura 2.34 – Execução de roscas [25].....	40
Figura 2.35 – Equipamento de Micro-EDM [29].....	42
Figura 2.36 – Representação do processo Micro-EDM assistido por Ultra-Sons [31]	43
Figura 2.37 – Diagrama esquemático para a rotação do eléctrodo no processo de Micro-Furação EDM por Eléctrodo Rotativo [32]	43
Figura 2.38 – Equipamento de Micro-WEDM Agie Excellence 2F [33].....	44
Figura 2.39 – Diagrama esquemático do processo de gravação por radiação directa do sincrotrão [34].....	46
Figura 2.40 – Impulsos de alguns nanosegundos versus impulsos de alguns femto ou picosegundos	48
Figura 2.41 – Técnica de Superfície Constrangida de Resina [38]	49
Figura 2.42 – Técnica de Superfície de Resina Livre [38]	49
Figura 2.43 – Técnica de Exposição Integral [38]	49
Figura 2.44 – Micro-rotor obtido por Micro-Estereolitografia [37].....	51
Figura 2.45 – Micro-roda dentada helicoidal obtida por Micro-Estereolitografia [37].....	51
Figura 2.46 – Processos de dissipação de energia de excitação de uma molécula [40]	52



Figura 2.47 – Diagrama esquemático do processo de Foto-polimerização Bi-Fotónica	53
Figura 2.48 – Imagens ampliadas de um micro-“touro” obtido por foto-polimerização bi-fotónica [43]	54
Figura 2.49 – Imagens ampliadas de uma micro-“Vénus” obtida por foto-polimerização bi-fotónica [43].....	54
Figura 2.50 – Fases do processo UPSAMS [44]	56
Figura 2.51 – Imagem de um rotor obtido pelo processo UPSAMS [44]	57
Figura 2.52 – Imagem de uma das pás do rotor [44].....	57
Figura 3.1 – Micro-provete (dimensões em mm).....	72
Figura 3.2 – Interacção do feixe laser com o material	75
Figura 3.3 – DMG DML40SI [2].....	78
Figura 3.4 – Foba G900 [3]	78
Figura 3.5 – Micro-provetes em STL.....	79
Figura 3.6 – Diagrama esquemático dos 3 eixos lineares de movimento da Foba G900	81
Figura 3.7 – Sequência de movimentos de mesa e de reajuste do feixe laser para a maquinação de paredes verticais [2]	83
Figura 3.8 – Comparação dos processos Laser Milling e Electroerosão por penetração	84
Figura 3.9 – DMU 60L [2]	85
Figura 3.10 – Pormenor do porta-ferramentas da DMU 60L [2]	85
Figura 3.11 – Obtenção da 2 ^a , 3 ^a e 4 ^a frequências harmónicas obtidas a partir de um laser Nd:YAG através da utilização de cristais ópticos não-lineares [6]	87
Figura 3.12 – Processos multi-feixe laser [8].....	88
Figura 3.13 – Processos multi-feixe laser 3D [9].....	88
Figura 4.1 – Dimensões do micro-provete.....	92
Figura 4.2 – Pormenor de montagem da sonda Kistler 6190A [1].....	93
Figura 4.3 – Micro-provete modificado.....	93
Figura 4.4 – Sonda Kistler 6190A	94
Figura 4.5 – Conjunto Unidade de Controlo e Unidade de Co-Injecção Eléctrica Plasdan EL27	95
Figura 4.6 – Moldação preparada para injecção dos 8 provetes no plano de junta do molde....	95
Figura 4.7 – Modelo 3D dos canais de alimentação.....	97



Figura 4.8 – Secções dos canais de alimentação.....	97
Figura 4.9 – Tempo de enchimento.....	98
Figura 4.10 – Pressão no enchimento	98
Figura 4.11 – Temperatura na frente do fundido	98
Figura 4.12 – Pressão no final do enchimento.....	98
Figura 4.13 – Perfil de velocidade de injecção recomendado pelo MoldFlow MPI.	98
Figura 4.14 – Força de fecho requerida.....	98
Figura 4.15 – Modelo 3D do inserto da cavidade 1	99
Figura 4.16 – Modelo 3D do inserto da cavidade 2	99
Figura 4.17 – Desenho do bico da unidade de co-injecção Plasdan 27E [4].....	100
Figura 4.18 – Resistências planas para aplicação por trás da cavidade 1.	101
Figura 4.19 – Resistências planas para aplicação por trás da cavidade 2, veja-se a furacão para as sondas Kistler.....	101
Figura 4.20 – Modelo 3D da chapa de aperto da cavidade 1, onde se podem ver as duas caixas destinadas a alojar as resistências planas e a zona central que serve de apoio ao inserto da cavidade para minimizar a flexão deste.....	101
Figura 4.21 – Esquema eléctrico de ligações das resistências planas e do respectivo agrupamento em zonas de temperatura, controladas individualmente	102
Figura 4.22 – Quadro de controlo.....	102
Figura 4.23 – Detalhe de montagem da sonda Kistler 6190A no molde, protegida por um tubo refractário.....	103
Figura 4.24 – Lateral do molde, onde se vêem assinaladas a azul as placas isolantes de 10mm.	103
Figura 4.25 – Modelo 3D em transparência da cavidade 1	104
Figura 4.26 – Modelo 3D em transparência da cavidade 2	104
Figura 4.27 – Modelo 3D em transparência da chapa suporte das cavidades 1 e 2.....	104
Figura 4.28 – Modelo 3D em transparência da chapa de aperto das cavidades 1.	104
Figura 4.29 – Modelo 3D com as chapas suporte e de aperto da cavidade 1 em transparência.	105
Figura 4.30 – Localização de prisões de ar obtidas no software Moldflow MPI	106



Figura 4.31 – Modelo 3D do bloco de travamento fêmea, montado no lado da cavidade 1. ...	107
Figura 4.32 – Modelo 3D do conjunto dos blocos de travamento montados.	107
Figura 4.33 – Modelo 3D em vista explodida de uma metade do molde.	108
Figura 4.34 – Máquina de Injecção D80 do Laboratório de Tecnologia Mecânica da ESTG Leiria.	110
Figura 4.35 – Regulação da Refrigeração da Máquina de Injecção D80.....	110
Figura 4.36 – Modelo 3D da estrutura de interface entre o molde e a unidade de co-injecção	111
Figura 4.37 – Fotografia do bico de injecção da unidade de co-injecção Plasdan EL27	112
Figura 4.38 – Diagrama esquemático da montagem da estrutura de interface, o molde e a unidade de co-injecção na máquina de injecção D80.	112
Figura 4.39 – Fotografia do conjunto molde-estrutura interface montado.....	112
Figura 4.40 – Pormenor do rasgo realizado para permitir o avanço do bico de injecção.....	112
Figura 5.1 – Rugosímetro Mahr Marsurf M2.....	115
Figura 5.2 – Fotografia da placa de testes em Aço Temperado.....	117
Figura 5.3 – Gráfico de rugosidades medidas nas cavidades A, D e E (valores em μm).	118
Figura 5.4 – Gráfico de rugosidades medidas nas cavidades H, I e J (valores em μm).....	118
Figura 5.5 – Perfil de rugosidade da cavidade I obtido no rugosímetro Mahr Marsurf M2.....	119
Figura 5.6 – Gráfico de rugosidades medidas nas cavidades B, F e G (valores em μm).	119
Figura 5.7 – Estimativa de tempos de processamento de cavidades com 25x5mm e 50x10mm, utilizando as mesmas distâncias entre varrimentos das cavidades B, F e G mas com apenas um varrimento (valores em segundos).....	120
Figura 5.8 – Gráfico de rugosidades medidas nas cavidades N, O, P e Q (valores em μm).....	121
Figura 5.9 – Evolução da tendência da rugosidade com o aumento da distância entre varrimentos	121
Figura 5.10 – Foto 50x da Cavidade N	121
Figura 5.11 – Foto 50x da Cavidade O.....	121
Figura 5.12 – Foto 50x da Cavidade P.....	121
Figura 5.13 – Foto 50x da Cavidade Q.....	121
Figura 5.14 – Foto ampliada 50x da Cavidade 1	123
Figura 5.15 – Foto ampliada 50x da Cavidade 2	123



Figura 5.16 – Resultados dos testes de remoção de material realizados para Aço Temperado – ST001, ST002 e ST003; Alumínio – AL001; Cobre Electrolítico – CE001 e Grafite – GF001.	125
Figura 5.17 – Gráfico comparativo entre a taxa de remoção de material e a rugosidade em função da frequência de impulso no processamento de aço temperado	127
Figura 5.18 – Gráfico comparativo entre a taxa de remoção de material e a rugosidade em função da potência do laser no processamento de aço temperado	128
Figura 5.19 – Gráfico comparativo entre a taxa de remoção de material e a rugosidade em função da frequência de impulso no processamento de duro-alumínio	128
Figura 5.20 – Gráfico comparativo entre a taxa de remoção de material e a rugosidade em função da corrente de lâmpada no processamento de duro-alumínio	129
Figura 5.21 – Gráfico da sobreposição do feixe laser em função da frequência de impulso e da velocidade de varrimento, para um feixe de diâmetro de 50µm	131
Figura 5.22 – Gráfico comparativo entre a taxa de remoção de material e a rugosidade em função da frequência de impulso no processamento de duro-alumínio a 200mm/s e a 300mm/s	131
Figura 5.23 – Gráfico comparativo entre a taxa de remoção de material e a rugosidade em função da potência do laser no processamento de duro-alumínio a 200mm/s e a 300mm/s	132
Figura 5.24 – Impressões em duro-alumínio obtidas por <i>Laser Milling</i>	134
Figura 5.25 – Câmara termográfica ThermoCAM PM575.....	135
Figura 5.26 – Montagem da câmara termográfica	135
Figura 5.27 – Termografia: Laser Milling em Aço ST001	136
Figura 5.28 – Termografia: Laser Milling em Aço ST002.....	136
Figura 5.29 – Termografia: Laser Milling em Aço ST003.....	136
Figura 5.30 – Termografia: Laser Milling em Duro-Alumínio AL001	136
Figura 5.31 – Termografia: Laser Milling em Cobre Electrolítico CE001.....	136
Figura 5.32 – Termografia: Laser Milling em Grafite grão fino GF001.....	136
Figura 5.33 – Mecanismo de reflexão de energia na superfície do material processado pelo feixe laser.	137



Figura 5.34 – Dados experimentais fornecidos pela Foba GmbH relativos à relação entre a corrente de lâmpada e a potência do laser	138
Figura 5.35 – Regressão linear para um Q-Switch de 1,5mm obtida a partir da interpolação dos coeficientes calculados para a regressão das curvas de potência do laser para valores de Q-Switch de 1,0 e 1,8mm, respectivamente.....	139
Figura 5.36 – Simulação numérica do varrimento laser a 200mm/s sobre aço temperado....	143
Figura 5.37 – Detalhe da zona final do varrimento onde se verifica a temperatura máxima, T=2082°C	143
Figura 5.38 – Simulação numérica do varrimento laser a 300mm/s sobre duro-alumínio.....	143
Figura 5.39 – Detalhe da zona final do varrimento onde se verifica a temperatura máxima, T=1309°C	143
Figura 6.1 – Montagem do molde e unidade de co-injecção na unidade de injecção D80	145
Figura 6.2 – Vista do molde montado do lado do operador	146
Figura 6.3 – Vista do molde montado do lado oposto ao operador	146
Figura 6.4 – Instrumentação de aquisição de dados de pressão e temperatura Kistler	146
Figura 6.5 – Unidade de controlo da unidade de co-injecção Plasdan EL27	146
Figura 6.6 – Unidade de controlo de temperatura das resistências do molde	146
Figura 6.7 – Injecção inicial com excesso de material.....	147
Figura 6.8 – Injecção posterior com insuficiência de material.....	147
Figura 6.9 – Injecção com insuficiência de material.....	147
Figura 6.10 – Moldação 1	148
Figura 6.11 – Moldação 2	148
Figura 6.12 – Moldação 3	149
Figura 6.13 – Moldação 4	150
Figura 6.14 – Moldação 5	150
Figura 6.15 – Moldação 6	151
Figura 6.16 – Imagem de alguns provetes destacados dos canais de alimentação.....	152
Figura 6.17 – Balança digital	152
Figura 6.18 – Amostras da Moldação 6	152



Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Classificação dos processos de micro-fabricação segundo os critérios definidos em 2.3.1 e 2.3.2.....	17
Tabela 2.2 – Comparativo de capacidades entre todos os processos de Micro-Fabricação, estabelecendo a distinção entre aqueles considerados directos e indirectos, de acordo com os critérios definidos em 2.3.2.....	58
Tabela 2.3 – Comparativo de fontes de energia, acessibilidade, tempo de processamento e custos entre todos os processos de Micro-Fabricação, estabelecendo a distinção entre aqueles considerados directos e indirectos, de acordo com os critérios definidos em 2.3.2.	59
Tabela 2.4 – AHP aplicado às características dos processos de micro-fabricação para a produção de micro-componentes.	62
Tabela 2.5 – Classificação das características em função das prioridades definidas.	62
Tabela 2.6 – Pontações obtidas pelos diversos processos	64
Tabela 2.7 – Custos estimados para os processos de produção em série de micro-componentes, considerando a aquisição dos bens	65
Tabela 2.8 – A Micro-Fabricação na União Europeia, Estados Unidos da América e Japão, dados do Minatech Reports on Micro and Nano Tehcnologies, Dezembro de 2001.	67
Tabela 2.9 – Aplicações de Micro e Nanotecnologias actuais e futuras	68
Tabela 3.1 – Equipamentos de <i>Laser Milling</i> existentes em Portugal (2005)	73
Tabela 3.2 – Parâmetros operatórios do laser para a Foba G900.....	79
Tabela 3.3 – Parâmetros dos padrões de varrimento em <i>Laser Milling</i>	80
Tabela 4.1 – Avaliação da eficiência do material utilizado na moldação, em termos de peso e de volume. Foi considerada uma densidade média de 1,2g/cm ³ para o polímero (PP) a injectar.....	96
Tabela 4.2 – Lista de componentes da estrutura do molde.....	109
Tabela 5.1 – Parâmetros utilizados para Aço Temperado	116
Tabela 5.2 – Distâncias entre varrimentos, ângulos iniciais e incrementos angulares normalmente utilizados.	116



Tabela 5.3 – Parâmetros utilizados nas cavidades A, D e E.	118
Tabela 5.4 – Parâmetros utilizados nas cavidades H, I e J.	118
Tabela 5.5 – Parâmetros utilizados nas cavidades N, O, P e Q.	121
Tabela 5.6 – Valores obtidos na medição das cavidades 1 e 2, realizadas com apenas um varrimento para análise do efeito de orientação das estrias decorrentes do processo <i>Laser Milling</i>	122
Tabela 5.7 – Parâmetros utilizados para cada material, nos testes de remoção de material... ..	124
Tabela 5.8 – Parâmetros utilizados para cada material, nos testes comparativos entre a taxa de remoção de material e a respectiva rugosidade obtida para diversos valores de frequência de impulso e corrente de lâmpada.	126
Tabela 5.9 – Parâmetros utilizados para as impressões.	134
Tabela 5.10 – Propriedades utilizadas dos materiais em análise na simulação de varrimento laser.	140
Tabela 5.11 – Propriedades ópticas de materiais comparáveis aos que estão em análise na simulação de varrimento laser [5].	141
Tabela 5.12 – Parâmetros utilizados na simulação numérica.	142
Tabela 6.1 – Pesos das amostras obtidas na Moldação 6.	153



1. Introdução

Desde o início da era industrial, em meados do século XIX, o Homem tem vindo a conseguir um notável conjunto de feitos nos mais diversos domínios tecnológicos.

A procura incessante de novos caminhos, novos destinos e novas ferramentas, fez evoluir o conhecimento da comunidade científica desde o fundo dos oceanos até ao espaço sideral, do gelo polar até às selvas tropicais, do comboio a vapor até à nanomanipulação...

1.1. As Micro e as Nanotecnologias

A miniaturização de componentes e sistemas incorporados nos mais diversos ramos da indústria, aplicações médicas e domésticas constituiu-se como uma realidade das duas últimas décadas. A evolução constante de técnicas de micro-fabricação e de materiais tem criado novas aplicações, mais complexas, mais eficazes e mais ambiciosas no que toca à visão do futuro.

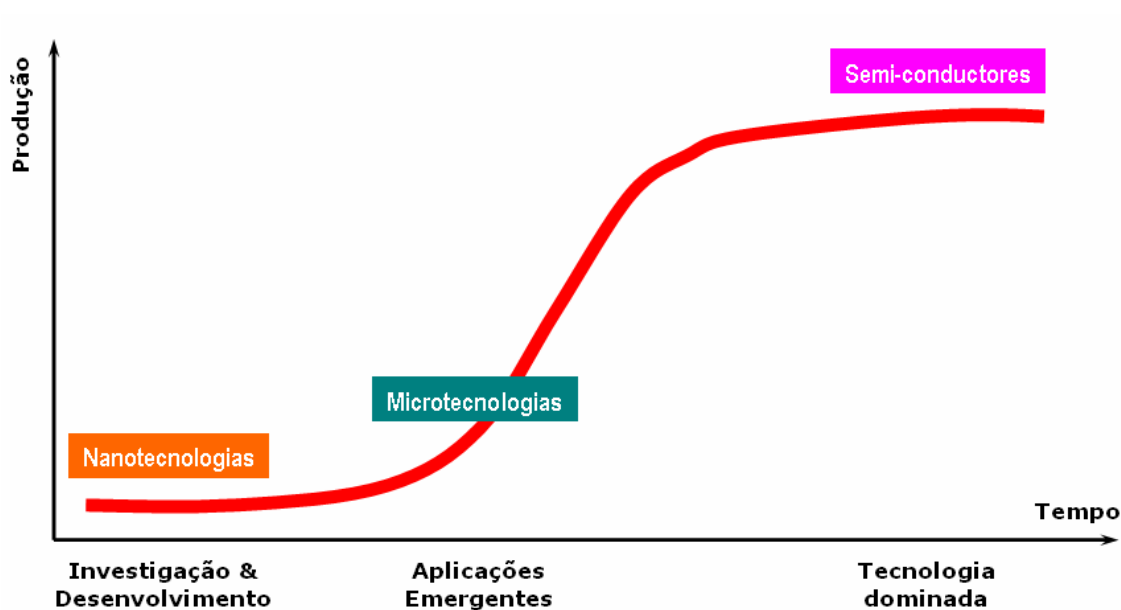


Figura 1.1 – Evolução no tempo em função das quantidades produzidas para as diferentes tecnologias normalmente associadas à miniaturização de componentes e sistemas.



A Figura 1.1 ilustra graficamente o contexto actual das tecnologias associadas à miniaturização. A indústria de semi-condutores estabilizou em termos de domínio tecnológico após um período de grande evolução associado ao crescimento de aplicações nos domínios da informática e da micro-electrónica nas décadas de 80 e 90.

As micro-tecnologias mostram actualmente um enorme potencial evolutivo tendo já aplicações muito promissoras ao nível da micro-óptica, micro-fluídica, micro-electrónica e da micro-mecânica, relacionadas, quase todas elas com aplicações médicas ou ligadas à saúde como a sensorização e monitorização.

As aplicações orientadas para as nanotecnologias já existem, contudo, o domínio tecnológico actual a esta escala verifica-se apenas ao nível da óptica estando os restantes domínios ainda algo reservados para um futuro próximo.

No final do Capítulo 2 é feito um pequeno resumo das aplicações futuras onde se poderão vir a encontrar micro e nano, tanto componentes e sistemas.

1.2. A indústria de Moldes e as Micro-Tecnologias

A indústria portuguesa dos moldes de injecção para plásticos caracteriza-se actualmente pelo baixo nível de incorporação de valor acrescentado, lamentavelmente, por insuficiência de quantidade de agentes em termos nacionais que potenciem o desenvolvimento de produtos próprios e com uma identidade característica do seu país de origem.

A indústria de moldes nacional surge assim tipicamente como um fornecedor de segunda linha em mercados tão apetecíveis como é a indústria automóvel, a maior das indústrias-cliente dos moldes fabricados em Portugal ou mesmo a electrónica de consumo.

No domínio tecnológico, a indústria de moldes nacional está bem equipada, ao nível dos seus concorrentes directos neste sector, contudo, essa vantagem rapidamente se esbateu pelo facto de os investimentos feitos ao nível do equipamento não terem sido devidamente complementados com investimentos ao nível da formação de recursos humanos. Esta opção permitiria otimizar o desempenho de todos os intervenientes, contribuindo assim para maximizar a produtividade, fazendo dessa forma face aos concorrentes que utilizam como



argumento comercial o baixo custo de produção, ainda que isso implique o recurso a expedientes criticáveis do ponto de vista humano e social, pouco próprios dos dias de hoje.

A aposta em novas tecnologias para captar novos sectores de actividade industrial como cliente da indústria de moldes introduz também uma mudança estratégica neste sector. Nas duas últimas décadas, a aquisição de novos equipamentos nem sempre foi seguido do investimento necessário em termos humanos, contudo, o avanço para um patamar tecnológico superior está longe de dispensar a formação, a pesquisa e o desenvolvimento necessários para que todos os recursos sejam devidamente aproveitados.

Sendo a transformação de plásticos uma das indústrias de eleição para a produção em massa de artigos de grande consumo, a adopção de Micro-Tecnologias por parte da indústria de moldes resulta assim naturalmente. A aplicação de micro-componentes na esmagadora maioria dos produtos que nos rodeiam é uma forte motivação para a indústria de moldes nacional, dado que possibilita a abertura de novos mercados onde até agora tinha pouca representatividade como a medicina ou a bio-mecânica. A expressão destas indústrias enquanto clientes da indústria de moldes nacional tem sido relativamente reduzida devido ao elevado nível de exigência imposto na qualidade, principalmente, devido às questões relacionadas com a não-contaminação dos componentes moldados.

Esta dissertação surge no início do ano de 2006, período em que existe uma forte motivação por parte das empresas para o investimento em equipamentos associados à Micro-Fabricação, com o intuito evidente de produção de ferramentas para processos de produção em massa, como a Micro-Injecção. Contudo, esta forte motivação demonstrada deverá ser acompanhada de um levantamento das necessidades em termos da execução das ferramentas e das capacidades e limitações evidenciadas pelos processos. A corrida cega à tecnologia, como meio de resolução dos problemas patentes nesta indústria, já provou num passado não muito longínquo ser uma péssima opção.

É neste contexto que esta dissertação procura dar algumas respostas, nomeadamente, resumizando os processos de Micro-Fabricação mais relevantes e analisando as suas capacidades face às necessidades que a indústria de moldes nacional apresenta actualmente.



1.3. Conteúdo da Dissertação

Após este capítulo introdutório é analisado no Capítulo 2 o estado da arte das técnicas de micro-produção em série e de micro-fabricação actualmente disponíveis. As técnicas de micro-fabricação são caracterizadas quanto ao seu funcionamento e capacidades e agrupadas segundo classificações relevantes no contexto dos processos de micro-produção em série. As limitações técnicas que alguns processos de micro-fabricação ainda possuem justificam a necessidade de uma análise comparativa entre aquilo que é possível realizar e o seu custo, de modo a privilegiar a componente produtiva do processo.

No Capítulo 3 é escolhido o componente para testes, realizada a análise de necessidades e eleitos os critérios para a selecção do processo de micro-fabricação a utilizar. Após a selecção do processo, este é analisado detalhadamente para melhor se compreenderem os fenómenos que poderão influenciar os resultados obtidos em termos, quer dos micro-moldes, quer dos componentes a produzir.

O Capítulo 4 descreve em detalhe toda a estrutura do molde que envolve as cavidades moldantes obtidas pelo processo de micro-fabricação por Laser descrito no Capítulo 5.

Os resultados dos testes de micro-fabricação realizados são apresentados no Capítulo 5. Tratando-se de um processo cuja capacidade de processamento é importante analisar, é estudada em detalhe a relação entre o acabamento superficial e a taxa de remoção de material. Dado que se trata de um processo fundamentalmente térmico, a influência dos fenómenos associados à elevação de temperatura é também analisada de modo à prévia análise e optimização do processo, decorrente da interacção laser-material, é proposto no Capítulo 5 um modelo de simulação do processo utilizando o software Ansys. Os resultados numéricos são igualmente comparados com resultados experimentais de modo a aferir-se da realidade da simulação.



Os resultados dos testes de injecção dos micro-componentes são apresentados e comentados no Capítulo 6, sendo finalmente apresentadas no Capítulo 7 as conclusões obtidas quanto à utilização do processo escolhido para a aplicação proposta.



2. Micro-Fabricação: Estado da Arte

2.1. Introdução

A miniaturização de componentes e de sistemas é, claramente, uma tendência global dos sectores tecnológicos mais avançados. Nas duas últimas décadas, têm vindo a surgir necessidades cada vez maiores de micro-componentes e de micro-estruturas dado o constante aumento do número de aplicações técnicas nas áreas da biomedicina, farmacêuticas, fibras ópticas, micro-electrónica, telecomunicações, informática de consumo, indústria automóvel, entre outras [1].

Os desafios tecnológicos colocados por este tipo de necessidades têm impulsionado as tecnologias de fabrico de micro-componentes que, por sua vez, oferecem novas soluções e permitem o aumento da complexidade de execução dos componentes obtidos.

Os termos micro-componente ou micro-estrutura designam um componente ou uma estrutura com dimensões sub-milimétricas, ou seja, componentes ou estruturas cujas dimensões se situam na casa das centenas de micrómetros e com tolerâncias na vizinhança do micrómetro ou mesmo abaixo deste valor [1].

A massificação do uso deste tipo de componentes assim como as suas crescentes exigências técnicas concorrem para o desenvolvimento contínuo das técnicas de produção em série actualmente existentes, de forma a dar resposta a um mercado em crescimento acelerado.

Neste capítulo descrevem-se os principais processos de micro-fabricação. Estas diferenças são alvo de uma adequada identificação e da respectiva classificação de acordo com a sua natureza.



Face à necessidade da produção em larga escala de micro-componentes, alguns desses processos possibilitam a obtenção directa de micro-estruturas ou micro-cavidades que podem ser utilizadas directamente como ferramenta. Esta distinção entre processos com capacidades diferentes é igualmente tratada neste capítulo dada a sua relevância para o tema desta dissertação.

A vertente económica da utilização destes processos é igualmente um importante factor a considerar. Dependendo das fontes de energia de que cada processo depende e dos materiais utilizados, a opção por determinado processo poderá ter que obedecer a um compromisso entre o custo de utilização, a quantidade de micro-componentes a obter e/ou a sua geometria.

2.2. Processos de Produção de Micro-componentes em Série

Os processos de produção em série de micro-componentes têm desempenhado um papel importante na disseminação dos micro-sistemas que se encontram actualmente incorporados em diversas indústrias.

As duas técnicas principais de produção em série de micro-componentes são:

- Micro-Injecção
- Micro-Gravação a Quente (Micro Hot Embossing)

Estas técnicas apresentam características diferentes e, conseqüentemente, capacidades diferentes, podendo por isso serem complementares no contexto da obtenção de micro-estruturas funcionais.



2.2.1. Micro-Injecção

À semelhança do que acontece com a moldação por injecção convencional, este processo é um dos mais utilizados ao nível micrométrico.

A micro-injecção teve grandes evoluções nos meados da década de 90, devido ao desenvolvimento de equipamentos especificamente dedicados à produção de micro-componentes. A redução dramática do volume de injecção representou um dos factores que mais contribuiu para a evolução deste processo [2].

As soluções construtivas adoptadas pelos vários construtores que fabricam equipamentos para micro-injecção diferem quanto à forma de doseamento da quantidade de material a injectar, à estrutura do equipamento e respectiva zona de contenção e aos vários equipamentos acessórios que podem ser montados com o intuito de incrementar a produtividade ou o controlo de qualidade dos componentes produzidos.

A este nível existem três grandes construtores de sistemas de micro-injecção, com equipamentos especialmente desenvolvidos para o mercado:

- Arburg
- Rondol
- Battenfeld

A Arburg Allrounder 170U (Figura 2.1) e a Rondol High Force 5 (Figura 2.2) possuem soluções relativamente clássicas quanto à tipologia do molde e ao doseamento do material.



Figura 2.1 – Arburg Allrounder 170U



Figura 2.2 – Rondol High Force 5



Considerando a dimensão das componentes a injectar, é expectável que a dimensão dos moldes lhe seja proporcional. Todavia, para fazer chegar o material a injectar às impressões, os moldes utilizados nestes equipamentos deverão possuir uma alimentação cuja geometria e dimensões não estão muito longe das convencionais. Atendendo ao baixo peso das peças injectadas, poder-se-á incorrer facilmente em situações em que o peso das peças obtidas é menos de 10% do peso total da moldação.

Em ambos os equipamentos ilustrados nas Figuras 2.1 e 2.2, o doseamento de material a injectar é feito recorrendo a um fuso com os movimentos de rotação e translação combinados, à semelhança do que acontece nos fusos convencionais.

A Battenfeld Microsystem 50 (Figura 2.3) é um equipamento com várias soluções integradas, embora a maior parte destas sejam opcionais. O equipamento base comporta soluções que vão desde o aumento da produtividade até à paletização automática, passando pelo controlo de qualidade equipado com vários sistemas de visão artificial para inspecção de não-conformidades.

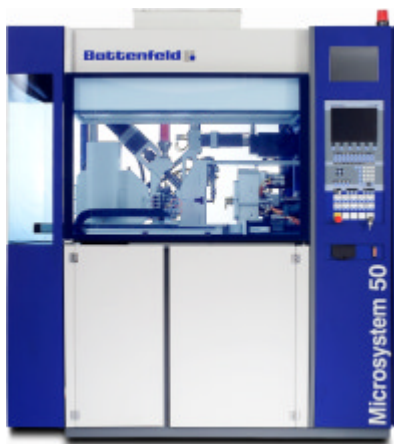


Figura 2.3 – Battenfeld Microsystem 50

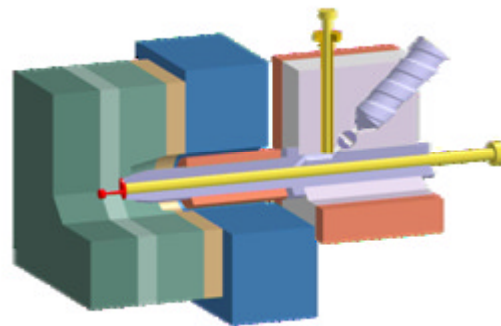


Figura 2.4 – Detalhe do sistema de doseamento e da alimentação da Battenfeld Microsystem 50

Neste equipamento, a Battenfeld propõe uma solução para aumentar a eficiência de utilização do material. O molde deverá ser projectado para que o bico da unidade de injeção possa penetrar até ao plano de junta (Figura 2.4). Desta forma, a injeção poderá ser feita directamente na peça ou numa pequena bolacha de material de onde poderão derivar canais secundários caso se trate de um molde multi-cavidade. Outro mérito deste sistema de injeção é



a precisão do doseamento conseguido, o doseamento por pistão permite um controlo mais eficaz sobre o volume de material a injectar, capacidade essa que não é tão fiável nos doseamentos por fuso alternativo.

Tanto a Arburg Allrounder 170U como a Battenfeld Microsystem 50 colocam em opção fusos e cilindros de injecção revestidos por metal duro para poderem efectuar a injecção de pós cerâmicos ou metálicos.

2.2.1.1. O Molde

Tendo em conta a utilização no processo de micro-injecção, em que os micro-componentes, ou seja, as zonas moldantes, têm de suportar pressões de injecção semelhantes às verificadas no processo de injecção convencional, podem ser considerados os seguintes critérios para a selecção do material para o molde [3]:

- Dureza dos insertos
- Resistência à corrosão
- Capacidade de aceitar revestimento
- Homogeneidade da estrutura

Para o processo de micro-injecção são seleccionados polímeros com viscosidades baixas para melhorar o desempenho do processo, genericamente, Polímero Líquido Cristalino (LCP), Copolímero Olefino Cíclico (COC), Policarbonato (PC), Poliestireno (PS), Poli-Éter de Fenileno (PPE), Poli-Metacrilato de Metilo (PMMA), Poliéter-éter Cetona (PEEK), Polissulfonas (PSU), Poliamida-Imida (PAI), Poliéterimida (PEI), Poli-Tereftalato de Butileno (PBT), Poliamida (PA), Poli-Óxido de Metileno (POM), Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) e Polipropileno (PP).

Não obstante a selecção apropriada do polímero a injectar, os parâmetros associados ao processamento são igualmente importantes.



O controlo de temperatura deve ser bastante apertado para garantir a qualidade dos micro-componentes injectados. De forma a baixar a viscosidade e dependendo da velocidade de injecção adoptada, podem utilizar-se temperaturas de molde bastante próximas da temperatura de fusão do polímero, no caso de este ser semi-cristalino, ou da temperatura de transição vítrea, se o polímero em processamento for amorfo.

2.2.2. Micro-Gravação a Quente

No processo de micro-gravação a quente [4], a matriz micro-estruturada vai ser pressionada contra um polímero termoplástico a uma temperatura superior à sua temperatura de transição vítrea (T_G). Após o arrefecimento do material abaixo de T_G , a prensa é aberta e a peça de termoplástico processada é removida da matriz (Figura 2.5).

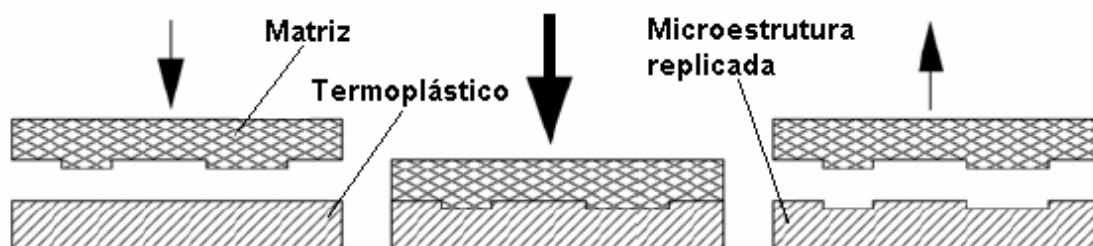


Figura 2.5 – Diagrama esquemático do processo de MicroGravação a Quente

Este processo de aquecimento da superfície do termoplástico é extremamente rápido e os métodos que o possibilitam possuem a capacidade de produzir micro-canais rapidamente. Comparado com a micro-injecção apresenta as seguintes vantagens:

- As matrizes são menos complexas e menos dispendiosas do que os moldes para micro-injecção
- As peças apresentam menos tensões residuais
- Trata-se de um processo contínuo de produção em grande série.



Contudo, dada a natureza do processo de micro-gravação a quente, as limitações impostas à geometria das peças obtidas são, obviamente, elevadas, nomeadamente no que respeita à razão de aspecto. Alguns dos principais sistemas comercialmente disponíveis são apresentados nas Figuras 2.6 e 2.7.



Figura 2.6 – Jenoptik Mikrotechnik HEX 01



Figura 2.7 – EVG 250HE

2.2.2.1. Aplicações

Uma das aplicações mais importantes é a indústria médica, na produção de MEMS, para o fabrico de micro-canais para medição e identificação de substâncias desconhecidas ou a determinação de componentes de células ou proteínas a partir de uma única gota de fluido no domínio da genética. Outra aplicação relevante para os micro-canais é a dos cartuchos de impressão para impressoras de jacto de tinta; estes controlam a quantidade óptima de tinta a transportar para a cabeça de impressão.

2.2.2.2. Processos de aquecimento

O material a processar deve ser aquecido, os equipamentos de micro-gravação aplicam uma pressão que pode ir de 50N até 20kN pelo que o termoplástico deverá ser aquecido, tipicamente, a temperaturas entre 220 e 250°C.



Os processos de aquecimento do material utilizados na micro-gravação a quente são os seguintes:

- **Ultrasons:** O aquecimento é realizado por um dispositivo de ultrasons. Neste caso, os principais parâmetros a controlar são: a amplitude, a pressão, o tempo e o pré-aquecimento com ar quente.
- **Radiação Infravermelha:** O aquecimento é realizado por um laser emitindo na gama dos infravermelhos. O feixe deverá ser divergente de forma a elevar a temperatura numa área ligeiramente superior à que irá ser prensada. Os parâmetros a controlar são: a intensidade do laser, a pressão e o tempo de aquecimento.
- **Ar Quente:** O aquecimento é realizado por uma pistola de ar quente de modo a elevar a temperatura da área que irá ser prensada até aos 250°C, após o que é aplicada uma força de 250N, o único parâmetro a controlar é o tempo de aquecimento.

2.2.2.3. Materiais

Os materiais mais utilizados neste para este processo são: Poli-Metacrilato de Metilo (PMMA), Poli-Óxido de Metileno (POM), Policarbonato (PC), Fluoreto de Polivinilideno (PVDF) e Polisulfonas (PSU). Áreas com diâmetro até 100mm podem ser gravadas por este processo, conseguindo-se uma rugosidade nas paredes laterais inferior a 50nm, o que torna este processo apto para aplicações micro-ópticas.



2.3. Processos de Micro-Fabricação

O sucesso económico dos processos de micro-fabricação depende largamente da capacidade que os seus produtos possuem para serem utilizados como ferramentas para produção em série [2].

Assim, a classificação dos vários processos é aqui apresentada em função de critérios relevantes para a caracterização destes do ponto de vista tecnológico e na perspectiva da sua aplicação.

2.3.1. Classificação dos Processos quanto à técnica utilizada

À semelhança do que acontece em termos convencionais, os processos dividem-se em dois grandes grupos, compreendendo num grupo os processos de remoção de material, independentemente da técnica utilizada e no outro grupo os processos aditivos [5].

Dentro de cada um destes grupos existem diversos processos com técnicas similares mas que utilizam tecnologias distintas. Fora destes dois grandes grupos, existem também processos combinados de deposição de material e posterior remoção que serão denominados como processos híbridos (Figura 2.8).



Figura 2.8 – Classificação dos processos de microfabricação quanto à técnica utilizada

Dentro dos processos designados como Não-Litográficos, encontram-se os processos que recorrem ao corte, arranque ou vaporização de material, dependendo do facto de a ferramenta utilizada pelo processo ser ou não física.



2.3.2. Classificação dos Processos quanto à utilização dos seus produtos

Os processos anteriormente descritos, por si só, são aptos para produzir micro-componentes. As suas capacidades dependem dos princípios e das técnicas e tecnologias utilizadas. Contudo, o factor que dita a diferença entre o simples micro-componente e a sua potencial utilização como uma ferramenta para um processo de produção em série é o material em que este é executado assim como o acabamento superficial que o processo consegue oferecer ao micro-componente.

Deste modo, estes processos dividir-se-ão em duas grandes vertentes:

- Processos Directos: todos aqueles cujo material a processar pode ser imediatamente utilizado como ferramenta para aplicação num processo de micro-produção. Esta necessidade decorre do facto da sua utilização como ferramenta implicar solicitações mecânicas.
- Processos Indirectos: todos aqueles que necessitam de processos posteriores à obtenção da geometria pretendida para poderem ser utilizados como ferramenta.

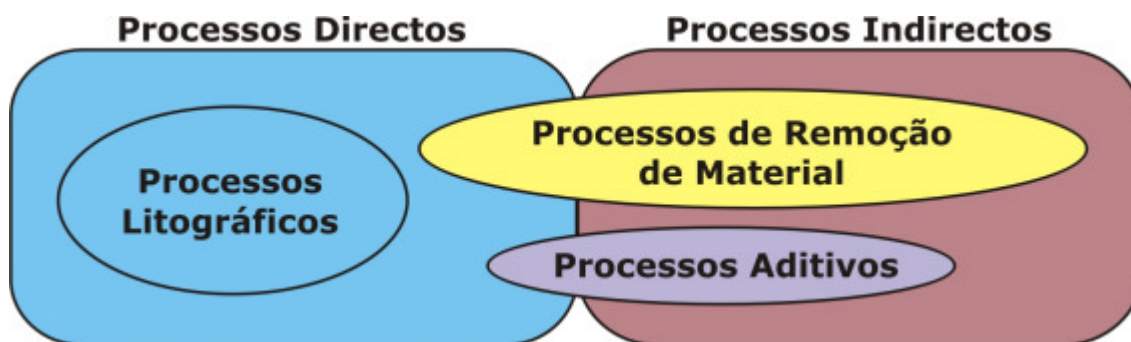


Figura 2.9 – Classificação dos processos de microfabricação em função da utilização dos seus produtos em processos de produção de micro-componentes em série subsequentes.

Uma das características associadas a estes processos e um dos grandes indicadores de capacidade do mesmo é a razão de aspecto dos componentes que conseguem realizar.

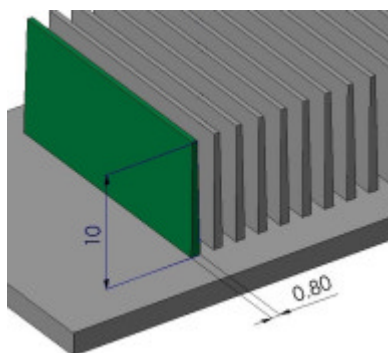


Figura 2.10 – Razão de aspecto

Por razão de aspecto (aspect-ratio) entenda-se como sendo a razão entre a altura máxima da estrutura e a menor dimensão lateral (Figura 2.10).

Este tem sido um dos maiores desafios colocados a estes processos de micro-maquinação, nomeadamente o aumento da altura máxima da micro-estrutura.

Algumas técnicas litográficas conseguem obter micro-componentes com razões de dimensões assinaláveis sendo, contudo, de geometria simples. As técnicas de corte por arranque de apara possuem fortes limitações devido ao facto de utilizarem uma ferramenta física mas mantendo, no entanto, uma flexibilidade excelente quanto às geometrias que podem realizar.

Encontram-se por isso, processos combinados entre várias técnicas que procuram retirar o melhor que cada técnica proporciona para superar limitações no que diz respeito à razão de aspecto possível de atingir ou à geometria que é possível realizar.

Na Tabela 2.1 apresentam-se as principais técnicas utilizadas, associadas aos processos de micro-fabricação.



Tabela 2.1 – Classificação dos processos de microfabricação segundo os critérios definidos em 2.3.1 e 2.3.2

Tipo de Processos	Técnica Utilizada	Processo
Processos Directos	Processos Litográficos	LIGA Raio-X LIGA-UV LIGA-Feixe de lões LIGA-Laser
	Processos Não-Litográficos (remoção de material)	<i>Laser Milling</i> Gravação por Feixe lões
	Processos Não-Litográficos (remoção de material por ferramenta física)	Micro-Fresagem Micro-Torneamento Micro-Furação Micro-EDM Micro-Furação EDM Micro-WEDM
	Híbrido (aditivo e substractivo)	UPSAMS
Processos Indirectos	Processos Não-Litográficos (remoção de material)	Gravação por Radiação Directa Ablação Laser
	Processos Aditivos	Micro-estereolitografia Micro-sinterização Laser Foto-Polimerização Bi-Fotónica

2.4. Processos Directos

Descrevem-se em seguida alguns dos principais processos de micro-fabricação classificados anteriormente como processos directos, ou seja, aqueles que podem ser utilizados directamente como ferramenta para um processo de produção em série.

2.4.1. Processo LIGA Raio-X

Os processos litográficos foram os primeiros a demonstrar as capacidades necessárias ao fabrico de micro-componentes devido à sua elevada precisão. O processo LIGA original [6] foi desenvolvido há cerca de 20 anos, pelo Research Center FZK em Karlsruhe. A designação LIGA



é o acrónimo em alemão para as três principais fases do processo *L*itographie *G*alvanik *A*bforming, ou seja, Litografia por Raio-X, Electrodeposição de material e Técnicas de produção em série como a micro-injecção ou a micro-gravação a quente.

O processo LIGA Raio-X (Figura 2.11) utiliza como princípio a radiação de raios-X fornecida por um sincrotrão através de uma máscara colocada sobre um material de suporte, que incorpora um polímero de base e um material que vai funcionar como revelador. A máscara contém a geometria da área sujeita à exposição dos raios-X, o que condiciona o tipo de geometrias que se podem obter por este processo.

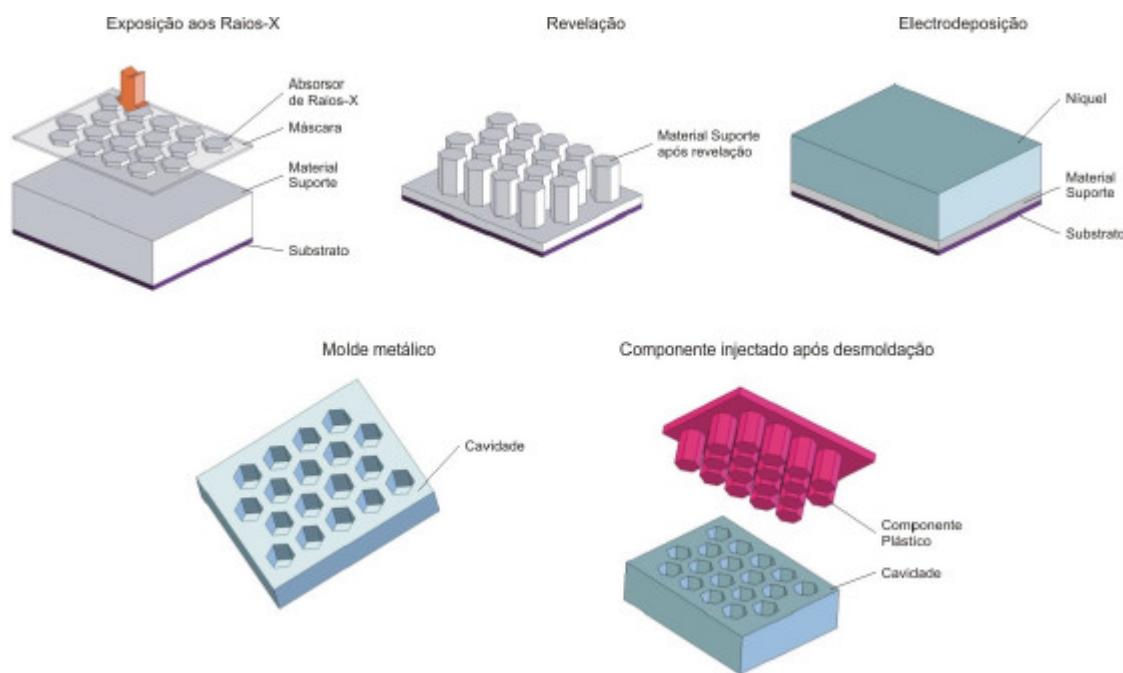


Figura 2.11 – Fases do processo LIGA Raio-X



Os materiais de suporte utilizados podem ser positivos ou negativos [7]. Designa-se por material positivo (Figura 2.12) aquele que, quando exposto à radiação, sofre uma degradação, tornando as áreas expostas solúveis por acção de um revelador. Designa-se por material negativo (Figura 2.12) aquele cujas áreas expostas sofrem um processo de cura, tornando apenas solúveis as áreas não expostas à radiação.



Figura 2.12 – Mecanismos de degradação e cura nos materiais suporte dos processos LIGA

A transformação química assim sofrida pelos dois diferentes tipos de material de suporte traduz-se em dois mecanismos distintos de obtenção da geometria pretendida (Figura 2.13).



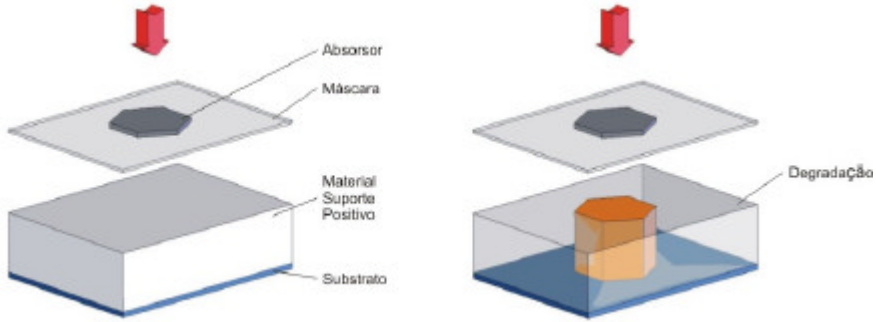
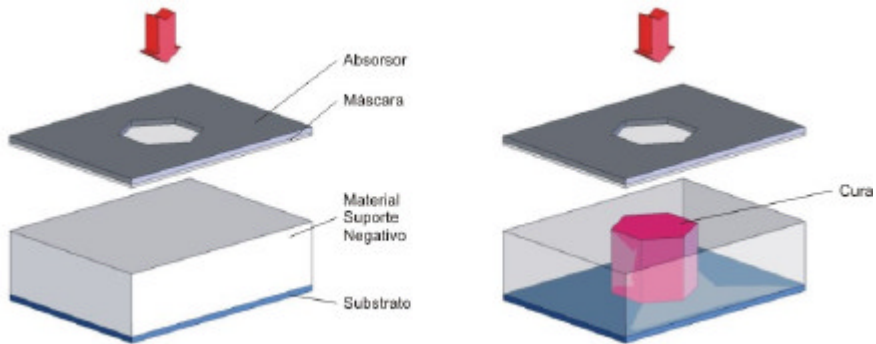
Materiais de Suporte	Mecanismos
Positivos	<p style="text-align: center;">Degradação do material a remover</p>  <p>As cadeias moleculares são quebradas por irradiação com partículas leves após o que o material exposto pode ser removido pelo revelador.</p>
Negativos	<p style="text-align: center;">Cura do material pertencente ao micro-componente</p>  <p>São formadas novas ligações moleculares (ligações cruzadas) o que faz com que as estruturas expostas sejam mais resistentes, fazendo com que o revelador remova o material excedente.</p>

Figura 2.13 – Tipos de máscaras utilizadas em função do tipo de material suporte

O processo LIGA Raio-X apresenta como principais vantagens face a outras técnicas de micro-fabricação [6]:

- estruturas com elevada razão de aspecto, até um máximo de 100:1,
- não existirem limitações no que se refere a objectos de secção constante,
- poder ser utilizada uma grande variedade de materiais: Polímeros, Metais e Cerâmicos,
- geometrias 3D podem ser conseguidas recorrendo a sistemas avançados de exposição à radiação e
- estruturas complexas ou parcialmente móveis podem ser conseguidas utilizando técnicas de materiais de suporte que possam ser sacrificados.



O processo tem sofrido bastantes evoluções, algumas delas com base na pura experimentação e que, contudo, têm obtido resultados bastante satisfatórios. Todavia, apesar do interesse que o processo LIGA despertou, está ainda longe de ser um sucesso económico, ao contrário do que acontece com as técnicas de micro-fabricação associadas à micro-electrónica.

Uma das fortes limitações apresentadas pelo processo é a falta de conhecimento base sobre:

- Propriedades e o desempenho dos materiais utilizados,
- Relações entre as propriedades dos materiais e os parâmetros de processamento, cujo desconhecimento contribui para as instabilidades verificadas no processo,
- Técnicas necessárias para desenvolver ou modificar “à medida” as propriedades dos materiais para utilizar neste processo em aplicações específicas.

2.4.1.1. Máscaras

A máscara ideal para raios-X consiste numa máscara que seja transparente aos raios-X e num material disposto em padrão que lhes seja opaco (que absorva os raios-X).

Como requisitos adicionais para uma máscara, contam-se a estabilidade mecânica, a compatibilidade com outros equipamentos e processos standard e um baixo custo. Tipicamente, o substrato das máscaras para utilização no processo LIGA é realizado em folhas de titânio ou de berílio, o que estrangula o processo no que respeita a tempos e custos de execução. Como alternativas possíveis, surgem membranas realizadas a partir de vidro, diamante, silício e nitrato de silício. O material absorvente mais utilizado é a grafite. Esta apresenta boas características de maquinabilidade, mas estudos preliminares indicam uma menor qualidade nas paredes verticais da estrutura, com rugosidades R_A de cerca de 200nm [7].



2.4.1.2. Material de Suporte

Existem vários critérios para validar a utilização de um material como a sensibilidade aos raios-X, resolução, contraste, estabilidade no processo, propriedades ópticas (variação do índice de refração, etc.) e a adesão a outros materiais.

Um dos poucos materiais que cumpre todos estes requisitos, sendo por isso o mais utilizado, é o PMMA. Este material possui boa adesão a superfícies de óxido de titânio e pode ser revelado selectivamente com o revelador GG (20% tetrahydro-1-4-oxazine, 5% 2-amino-ethanol-1, 60% 2(2-butoxy-ehoxy)ethanol e 15% de água desionizada), é estável durante o processo e oferece uma resolução inferior a 1 μ m.

Contudo, esta associação polímero/revelador - PMMA/GG, possui baixa sensibilidade o que exige tempos de exposição aos raios-X mais longos, tornando o processo mais dispendioso.

Uma das melhores alternativas ao PMMA/GG é a combinação Poli(Láctidos)/NaOH dado que apresenta uma sensibilidade 4 vezes maior aos raios-X que o PMMA/GG. Para além disso, os Poli(Láctidos)/NaOH são biocompatíveis e também biodegradáveis, propriedades estas cruciais para aplicações biomédicas.

Outra alternativa de material de suporte para o processo LIGA standard é o Fluoreto de Polivinilideno (PVDF), um polímero com propriedades piezoeléctricas, piroeléctricas e ferroeléctricas, que pode ser usado directamente através de gravação UV.

O SU-8 foi inicialmente desenvolvido pela IBM como um material de suporte para o processo LIGA - UV, sendo mais tarde modificado por Cremers [8]. Ao contrário de outros materiais de suporte, o SU-8 possui apenas 2 componentes: a resina e o foto-iniciador. Apesar de o PMMA continuar a ser o principal material de suporte utilizado, o SU-8 tem provado ser uma excelente alternativa, dado ter sido comprovado em vários estudos ser 200 vezes mais sensível aos raios-X, reduzindo o tempo de exposição de uma estrutura de 500 μ m a poucos minutos [8].

Para aplicações especiais, alguns materiais mais exóticos têm sido alvo de estudo, nomeadamente para ambientes corrosivos e de temperaturas elevadas. A este nível, o vidro foto-gravável tem-se mostrado bastante promissor [8].



2.4.1.3. Técnicas

Várias técnicas têm sido desenvolvidas no sentido de dar ao processo LIGA Raio-X maior versatilidade no tipo de geometrias que podem ser realizadas [9].

A técnica M²DXL (Figura 2.14) é utilizada para a obtenção de paredes inclinadas ou mesmo curvas através da movimentação da máscara durante a exposição aos raios-X. Para manter a profundidade de processamento, é necessário controlar a radiação que incide sobre o material suporte. Combinando várias máscaras e várias trajectórias de movimento, é possível obter microestruturas com paredes laterais de formas livres.

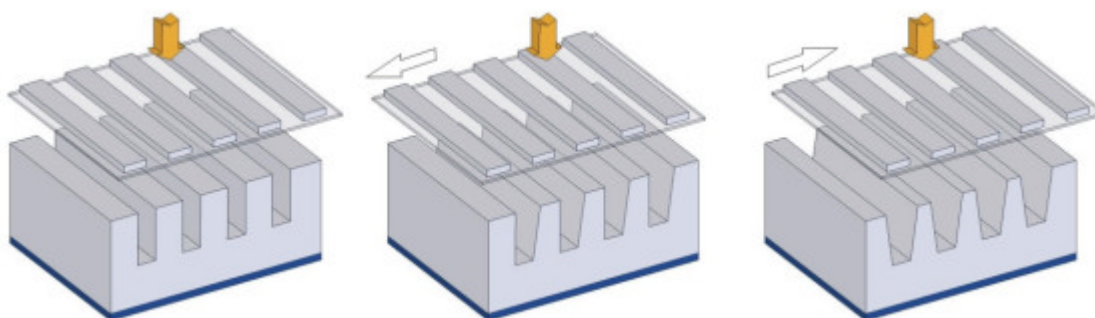


Figura 2.14 – Técnica avançada de exposição aos raios-X M²DXL no processo LIGA (Tabata, 2001)

O Sistema de Exposição de Raios-X Multi-Fase é baseado na técnica M²DXL, mas decorre no interior de uma câmara a operar em vácuo ou em atmosfera de hélio, equipada com vários modos de exposição e diversos graus de liberdade para as várias máscaras colocadas nas paredes da mesma.

A técnica de Exposição Dupla aos Raios-X (Figura 2.15) possibilita a obtenção de formas 3D simples. A primeira exposição é feita com uma máscara contendo a imagem da base da forma 3D. A segunda exposição é feita sem qualquer máscara e só depois se realiza a dissolução do material processado. Como existe material exposto por duas vezes e material exposto apenas uma vez, a dissolução dar-se-á de forma diferente, com taxas de revelação diferentes, formando planos inclinados a partir da imagem da base da forma.

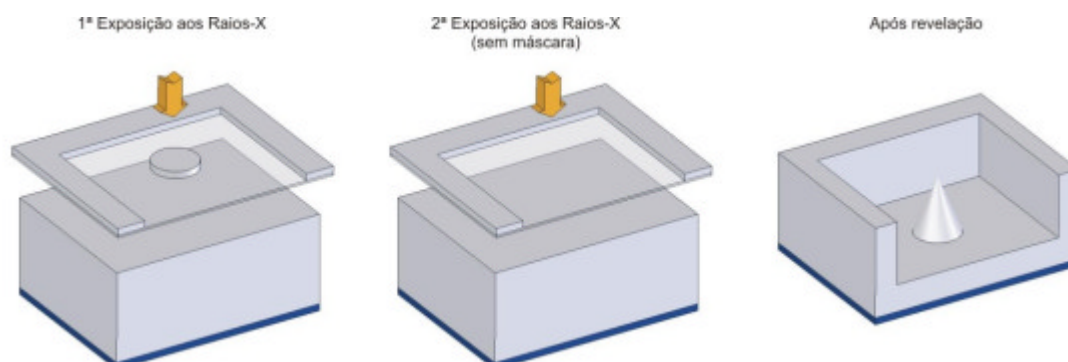


Figura 2.15 – Técnica avançada de Dupla Exposição aos raios-X no processo LIGA (Tabata, 2001)

2.4.1.4. Electrodeposição

Os materiais utilizados para esta fase do processo LIGA são de capital importância para as técnicas de produção em série ou para o fabrico directo de micro-estruturas. O material mais utilizado é o níquel, surgindo também aplicações de cobre e ouro. Em especial para zonas moldantes, onde são necessárias micro-estruturas bastante rígidas, a utilização de ligas metálicas como a de níquel-cobalto é bastante comum. Outras ligas, como as de níquel-tungsténio, cobalto-tungsténio ou níquel-ferro, têm sido também testadas com sucesso [6].

Para a produção de MEMS, são utilizadas tipicamente ligas de níquel-fósforo que oferecem melhores propriedades de resistência ao desgaste e à fricção que o níquel puro. Com estas mesmas características e uma maior dureza, podem também ser utilizados materiais compostos, de níquel carregado com micro ou nanopartículas de outros materiais como o diamante, nitreto de boro cúbico ou óxido de alumina (Al_2O_3).

2.4.1.5. Produção

Dentro das várias alternativas possíveis para a produção em massa, a micro-injecção apresenta-se como a mais atractiva para a produção de micro-componentes em polímero. O processo LIGA possibilita a execução de peças com elevada razão de dimensão, o que pode colocar problemas adicionais no molde, onde se pode tornar necessário garantir o enchimento perfeito de



estruturas bastante finas. Para obviar a esse problema, será recomendável a selecção de polímeros de baixa viscosidade, tais como PMMA, PSU, PC, POM, HDPE, PA e PEEK.

2.4.2. Processo LIGA – UV

O processo LIGA-UV é um processo de fabrico de micro-componentes com grande precisão ainda que menor que aquela que pode ser obtida no LIGA Raio-X. É, contudo, um processo mais acessível por utilizar uma fonte de exposição mais acessível e, essencialmente, menos dispendiosa [10].

O processo resume-se nas seguintes fases, tomando como material suporte um material positivo como o PMMA (Figura 2.16):

- O material suporte é exposto a luz UV através de uma máscara.
- O material suporte que foi degradado pela luz UV é removido.
- Os passos 1 e 2 são repetidos mais vezes com outras máscaras para produzir novas geometrias.
- É depositado metal por electrodeposição sobre o material suporte, formando uma cavidade do molde.
- O molde metálico obtido é então rectificado e o material suporte é dissolvido, deixando a cavidade vazia.
- O molde está pronto para moldar peças.

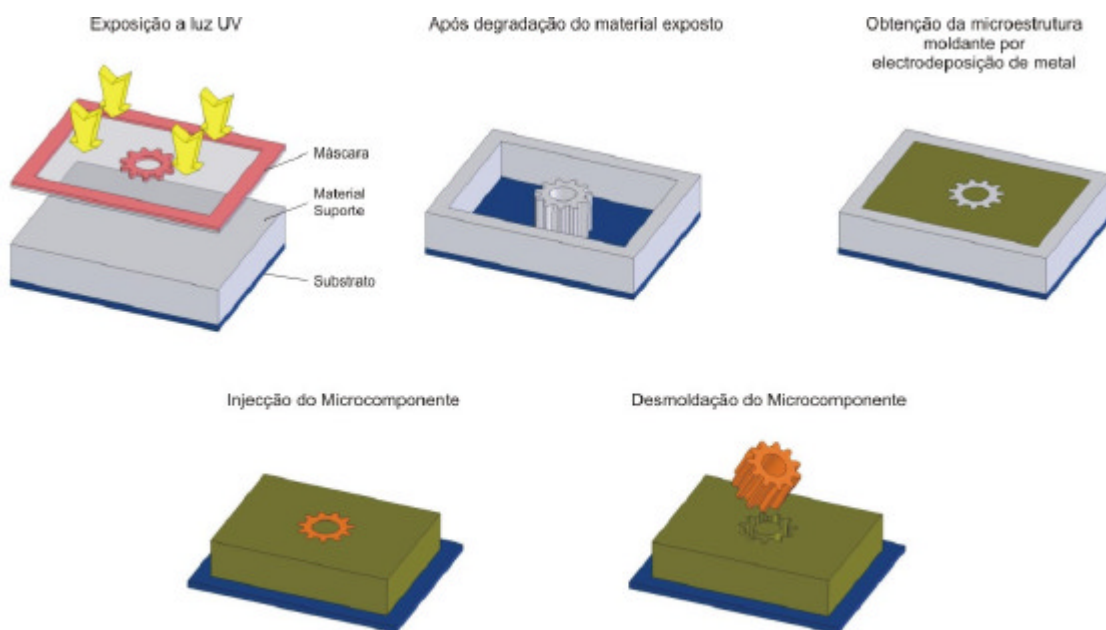


Figura 2.16 – Fases do processo LIGA-UV

Materiais utilizados

Os processos com fontes de exposição alternativas ao LIGA original, procuram manter o mesmo tipo de materiais [11]. Actualmente o SU-8 tem sido privilegiado em detrimento do PMMA, como material de eleição para este processo. Apesar de existirem tentativas no sentido de se desenvolverem novos materiais, o SU-8 é ainda o material de suporte que possibilita a obtenção de peças com maior razão de aspecto no processo LIGA-UV, até cerca de 20:1. Contudo, é extremamente difícil de dissolver, sendo de difícil remoção após a electrodeposição. Estes materiais alternativos ao PMMA demonstram, para já, grande potencial mas nesta fase ainda sem superar o desempenho do SU-8.

Vantagens e Inconvenientes face ao processo LIGA Raio-X

Esta comparação torna-se relevante dado os custos associados na utilização do processo LIGA Raio-X e que não se verificam no LIGA-UV, embora as capacidades de ambos os processos sejam bastante diferentes.



O processo LIGA-UV apresenta assim as seguintes características [12]:

Vantagens

- Processo de custo mais reduzido que o LIGA raio-X, as máscaras não necessitam de ser realizadas em materiais absorventes de radiação.
- Os custos associados ao investimento na tecnologia não são tão dispendiosos quanto os custos associados ao LIGA raio-X, pois utiliza uma fonte UV em detrimento de um sincrotrão.
- Processo com parâmetros bem estabelecidos.
- Compatível com grande variedade de materiais comercialmente acessíveis.
- Capacidade de produção em lotes.
- Grande variedade de aplicações.

Inconvenientes

- Menor resolução que a obtida no LIGA raio-X.
- Menor razão de aspecto para as peças produzidas.

2.4.3. Processo LIGA – Feixe de Iões (LIGA-IB)

O LIGA com recurso a um feixe de iões é um dos mais recentes desenvolvimentos associados a este processo [13]. A irradiação do material de suporte é realizada pelo bombardeamento com prótons, de dimensões submicrométricas, na casa dos 100nm, sendo em seguida revelado, deixando apenas as zonas não afectadas pelo feixe se se tratar de um material de suporte positivo ou as zonas afectadas pelo feixe se se tratar de um material de suporte negativo.

A máscara é utilizada essencialmente para perfis 2D viabilizando a realização de estruturas 3D, por via da alteração do ângulo de incidência do feixe sobre o material. Tipicamente, o material a



expor está dentro de uma câmara de vácuo onde o feixe de iões incide perpendicularmente à sua superfície.

A mesa de suporte do material pode ser controlada de modo a realizar rotações, fazendo assim oscilar o material a expor, criando ângulos de incidência do feixe diferentes do normal à superfície, possibilitando a obtenção de geometrias 3D e aumentando também a razão de aspecto dos componentes fabricados.

A altura das micro-estruturas é controlada através da energia do feixe. Tomando como material suporte o PMMA, conseguem-se alturas entre 14 e 160 μ m para energias entre 0.8 e 3,5MeV.

Este processo está mais disponível que o LIGA original dado que este necessita de um sincrotrão para gerar a radiação raio-X necessária para realizar o processo, contudo, necessita forçosamente de máscaras, é difícil de encontrar comercialmente e também bastante dispendioso [13].

Capacidades

Possui boas capacidades de fabrico, consegue razões de dimensões menores que aquelas que podem ser conseguidas no LIGA raio-X mas, ainda assim, relevantes. Os melhores resultados obtidos até à data materializaram-se numa parede de 3 μ m com 120 μ m de altura, obtendo uma razão de aspecto de 40:1. Em termos de rugosidades, foram medidos, quer nas paredes verticais, quer na superfície do fundo, valores de R_A de 10nm [13].

Aplicações

Pode produzir micro-estruturas 3D complexas, sem os encargos e os tempos inerentes à utilização de máscaras. Contudo, carece ainda de mais desenvolvimento que lhe permita melhorar as suas capacidades actuais sendo por isso, nesta altura, adequado à produção de pequenas séries, protótipos, moldes e até mesmo, máscaras [13].



2.4.4. Processo LIGA-Laser

Os processos LIGA continua a ser bastante atractivos, todavia, o facto de depender de uma fonte de radiação dispendiosa e comercialmente pouco acessível, faz com que sejam procuradas alternativas menos onerosas. Como consequência, apareceu em 1992 o LIGA – UV e dois anos mais tarde o LIGA – IB, qualquer deles com menos precisão ou com menos possibilidades de obter razões de dimensões tão elevadas quanto o LIGA Raio-X original, mas apesar disso com bastantes aplicações de sucesso [14].

Uma outra alternativa para produzir peças com elevada razão de aspecto é utilizar a ablação laser. Neste processo, o material suporte é atingido directamente por impulsos intensos de radiação UV, com comprimentos de onda de 248nm ou 193nm. A execução de formas tridimensionais é conseguida pela projecção de um feixe com secção controlada ou pela projecção de um padrão de uma máscara através de óptica adequada [14].

Como vantagens, refira-se que este processo, ao contrário do UV-LIGA, não tem as mesmas limitações devido à absorção de radiação. Isto deve-se ao facto de o processo de ablação ocorrer sempre na nova superfície da parcialmente formada micro-estrutura, em que o material ablado é expulso antes de receber um novo impulso de radiação. Tal como no LIGA Raio-X, LIGA-UV e LIGA-Feixe de lões, também neste processo se procuram formas de obtenção de geometrias tridimensionais complexas, o que se torna possível recorrendo à variação da velocidade de varrimento ou à variação da secção do feixe laser [14].

Por fim, existe uma grande variedade de polímeros que podem ser processados por ablação laser, aumentando o seu potencial e as possibilidades de integração com outros processos de micro-engenharia [14].

2.4.5. Laser Milling

O processo de maquinação de metais assistido por laser (sublimação de metais) foi estudado pela primeira vez em detalhe por Läßiger em 1995 [15]. Apesar das múltiplas aplicações possíveis que possui, esta técnica manifestou sempre alguns problemas, nomeadamente o sobreaquecimento das zonas adjacentes às processadas e a formação de resíduos. A elevada



taxa de vaporização de material provoca uma onda de choque e a elevada pressão de vapor sobre a superfície liquefeita aumenta consideravelmente a temperatura.

No final do impulso laser, o material fundido é expulso sob a forma de vapor. Estes fenómenos fazem com que nas áreas adjacentes às processadas, devidas às elevadas temperaturas e à sua posterior re-solidificação, se formem rebordos indesejados (Figura 2.17) e o endurecimento superficial (Figura 2.18) [16].

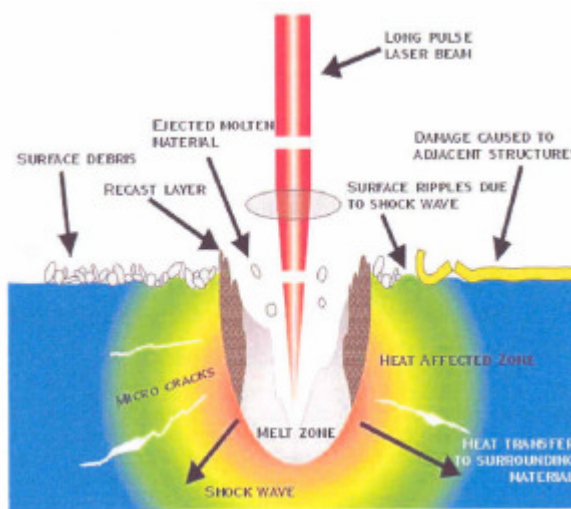


Figura 2.17 – Esquema representativo do processamento por lasers de baixa frequência e os efeitos adversos causados [16].

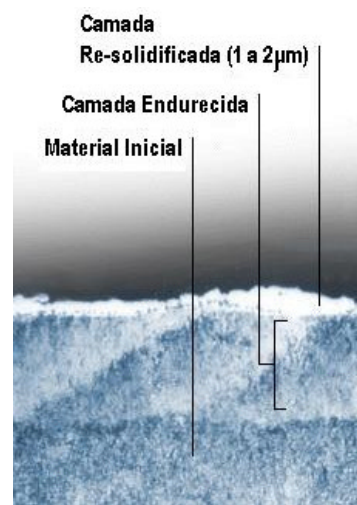


Figura 2.18 – Micrografia de Aço 1.2311 processado por Laser Milling [17].

No processamento de materiais duros e com lasers do tipo Qswitch Nd:YAG (Figura 2.19) podem ser conseguidos avanços significativos na qualidade do processo. A rugosidade e a formação de poros nas paredes laterais pode dificultar a produção em série de componentes por micro-injecção ou, pelo menos, constrange imenso a razão de aspecto das peças a injectar.

Um dos problemas pode ser a deformação plástica do material, causada por um gradiente de temperatura no substrato, induzindo também tensões residuais ao aço. A forma de prevenir tal situação é o arrefecimento do substrato, com ar ou gás a baixa temperatura.

Este arrefecimento, todavia, afecta também o processo de sublimação, reduzindo a sua taxa de processamento. Esta relação entre vantagens e inconvenientes do arrefecimento do substrato necessita ainda de ser devidamente apurada.

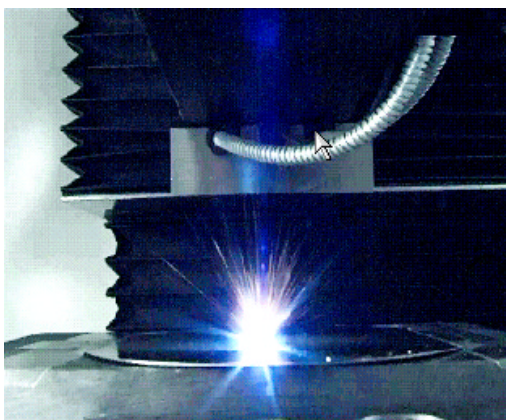


Figura 2.19 – Processamento por Laser Milling [17]

Recorrendo a operações de pós-processamento laser de regularização das paredes laterais, é possível desmoldar peças com razões de dimensões na ordem dos 10:1. Durante o processamento, um dos factores importantes a ter em conta é a temperatura e, conseqüentemente, o efeito que o arrefecimento terá sobre a qualidade do processo.

2.4.6. Gravação por Feixe de Iões

Esta técnica começou por ser desenvolvida no final da década de 70, sendo introduzida comercialmente como processo de micro-fabricação duas décadas depois [18].

A gravação por feixe de iões consiste no bombardeamento do material a processar por protões Ga^+ , gerados num acelerador de electrões. O feixe é obtido a partir da aplicação de um campo magnético de elevada intensidade a uma fonte de iões, provocando a emissão de iões carregados positivamente sobre o material em processamento, que se encontra dentro de uma câmara de vácuo. O feixe de iões atinge o objecto alvo causando a fusão e vaporização conseqüente no ponto de impacto.

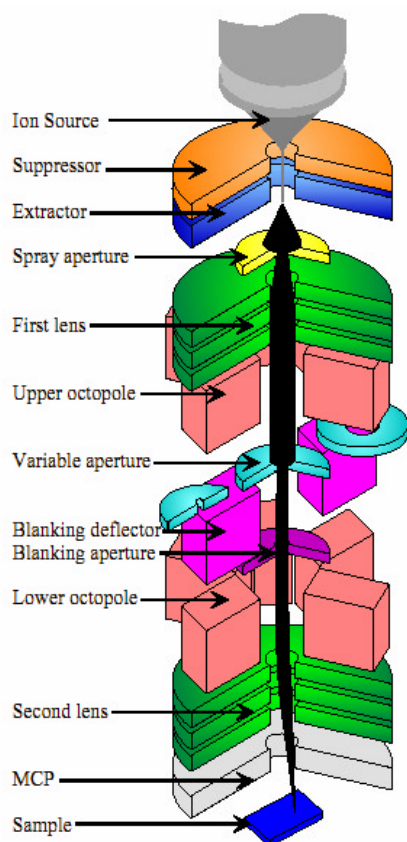


Figura 2.20 – Representação esquemática de uma coluna de iões para o processo de gravação [18]

No topo da coluna (Figura 2.20), encontra-se a fonte de iões. Esta é sujeita a um campo magnético, provocando a emissão do feixe de iões.

Após a calibração inicial, o feixe é condensado pelo primeiro conjunto de lentes electrostáticas.

O octópolo magnético superior ajusta então o estigmatismo do feixe.

A energia do feixe pode também ser ajustada em função da taxa de remoção de material pretendida, através da selecção do valor de corrente pretendido, valores esses que podem variar entre 1pA e 1,5nA.

Após o ajuste da corrente do feixe, este é relaxado antes de chegar ao octópolo magnético inferior, que é utilizado para conseguir o varrimento do feixe sobre o alvo, de acordo com a geometria definida pelo utilizador.

No segundo e último conjunto de lentes electrostáticas, o feixe é focado num pequeno ponto sobre o alvo, com uma dimensão de aproximadamente 10nm.

Em termos físicos, uma instalação para gravação por feixe de iões é composta por quatro componentes:

- Coluna de iões: A estrutura da coluna de iões é muito semelhante à do microscópio de varrimento electrónico (SEM), sendo que a diferença se encontra na utilização de um feixe de iões Ga^+ em vez de um feixe de electrões. A coluna é assim constituída por vários níveis onde se encontram dispositivos de focagem e calibração do feixe e para o controlo do varrimento.



- Câmara de Vácuo: Os materiais são processados dentro de uma câmara de vácuo, dentro da qual se encontram montados sobre uma mesa com 5 eixos de movimento. Dentro da câmara é mantida uma pressão de cerca de 10^{-7} mbar para condições normais de operação. A carga e descarga de material a processar/processado faz-se através de uma antecâmara para minimizar as perdas de vácuo.
- Sistema de Controlo de Vácuo e de Gás: O vácuo na câmara é assegurado por várias bombas de vácuo assim como o vácuo na coluna de iões, que é mantida sensivelmente à mesma pressão. Para além das bombas que operam continuamente durante a operação, existem normalmente turbo-bombas de vácuo para pressurizar a câmara e a coluna de iões no arranque do equipamento. Normalmente, este tipo de equipamentos também possui sistemas de injecção de gás para o interior da câmara com o objectivo de otimizar o desempenho do processo, nomeadamente o aumento da taxa de remoção de material [19]. Nas Figuras 2.21 e 2.22 ilustra-se a diferença na taxa de remoção de material com o auxílio de gás.
- Interface com o Operador: Todos os sistemas do equipamento podem ser controlados via computador. O operador apenas terá de assegurar a carga/descarga da antecâmara.

Ao contrário dos processos LIGA, este processo prescinde da máscara, ou seja, pode realizar directamente o varrimento com um feixe de iões de dimensões submicrométricas, na casa dos 10nm, direccionado para o alvo [20].

Tal como no processo LIGA correspondente, o material a processar está dentro de uma câmara de vácuo onde o feixe de iões incide na sua superfície. A mesa de suporte do material é controlada de modo a fazer o varrimento, com a possibilidade de realizar rotações sobre os eixos de movimento, fazendo assim oscilar o material, criando ângulos de incidência do feixe diferentes do normal à superfície, aumentando dessa forma a razão de aspecto dos componentes que é possível fabricar.

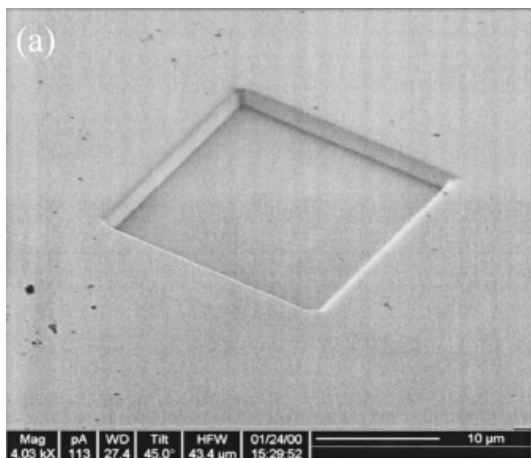


Figura 2.21 – Exemplo de Gravação por Feixe de Iões [19]

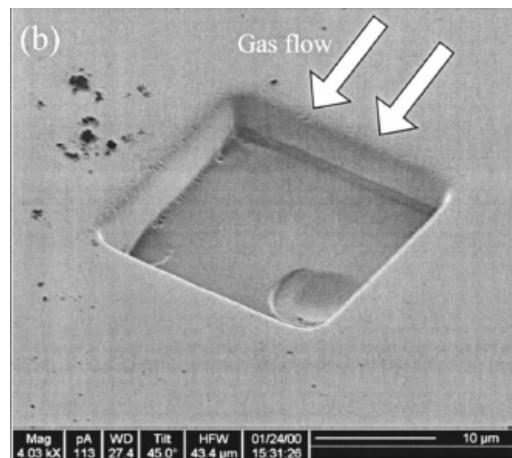


Figura 2.22 – Exemplo de Gravação por Feixe de Iões auxiliado por gás [19]

2.4.7. Micro-Sinterização Laser

A sinterização selectiva por laser é utilizada em termos convencionais desde finais da década de 80 em inúmeras aplicações no domínio da prototipagem rápida e do fabrico rápido de componentes, dada a sua capacidade de produzir não somente protótipos como também componentes funcionais, tanto em poliamida como em metal [21].

Em termos de capacidade, esta técnica demonstra uma enorme versatilidade, possibilitando a realização de componentes com formas tridimensionais complexas e que podem incluir zonas negativas ou a realização de zonas ocas dado não necessitar de suportes.

A evolução desta técnica para o nível micrométrico foi possibilitada pelo decréscimo na granulometria dos materiais para valores próximos dos $5\mu\text{m}$ e pelo aumento do desempenho dos lasers de estado sólido utilizados neste processo, uma vez que os lasers disponíveis até à data no mercado com diâmetros de feixe na ordem dos 40 a $500\mu\text{m}$ não proporcionavam a obtenção de componentes com dimensões inferiores a $100\mu\text{m}$ [22].

Em Maio de 2003, o Laserinstitut Mittelsachsen e. V. apresentou melhorias substanciais no processo, aumentando o seu desempenho, o que se traduziu numa resolução inferior a $30\mu\text{m}$ e valores de rugosidade R_A pouco superiores a $1,5\mu\text{m}$.



Com base nestes desenvolvimentos, a 3D-Micromac AG lança por esta altura no mercado o primeiro equipamento de micro-sinterização vocacionado para produção industrial com a designação *microSINTERING* (Figura 2.23) [22].

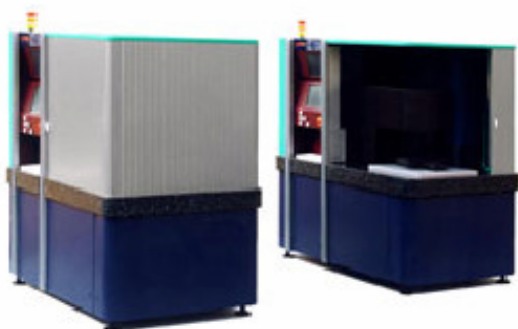


Figura 2.23 – Equipamento de MicroSinterização por Laser [23]



Figura 2.24 – Detalhe de operação da plataforma de processamento [22]

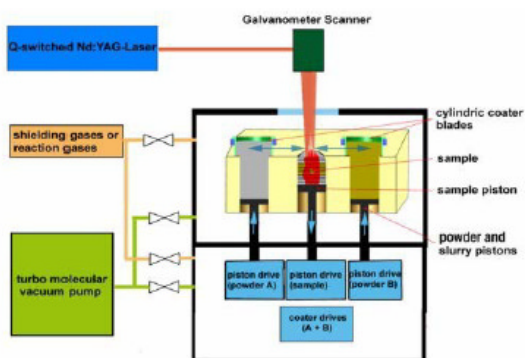


Figura 2.25 – Diagrama esquemático do processo de Micro-Sinterização por Laser [22]

O processo de construção decorre numa câmara de vácuo em aço inoxidável com uma janela de quartzo através da qual é realizado o varrimento laser. A alimentação de pó é realizada pelo movimento rotativo dos alimentadores (Figuras 2.24 e 2.25). A utilização dos dois alimentadores em simultâneo possibilita a combinação de materiais, permitindo a obtenção de componentes bi-material.

O processamento de materiais de tão baixa granulometria levanta problemas no manuseamento assim como no armazenamento. Tal como é possível constatar na Figura 2.25, todos os dispositivos de accionamento do sistema estão isolados para prevenir a contaminação pelo pó.

À semelhança do processo SLS convencional, também neste processo existe a plataforma onde o componente está a ser sinterizado, plataforma esta que vai descendo o equivalente à



espessura de uma camada para cada varrimento laser. Existem dois outros êmbolos que sobem, providenciando dessa forma material para os alimentadores rotativos transportarem até à plataforma de sinterização.

2.4.7.1. Especificações e Aplicações da Micro-Sinterização por Laser

Apesar de algumas das capacidades do processo já terem sido já terem sido anteriormente mencionadas, não deixa de ser relevante enumerar algumas das características do equipamento:

- Dimensões da câmara de processamento: Ø25x40mm (Ø50x40mm opcionalmente),
- Dois reservatórios de material com Ø25x40mm,
- Produtividade até 0,02mm³/s (utilizando frequência laser de 50KHz),
- Laser bombeado por diodos, possível de operar em vários comprimentos de onda,
- Pressão da câmara ajustável entre 10⁻⁵ e 1,5bar,
- Possibilidade de processamento em atmosfera controlada e
- *Software* para importação e *slicing* do componente CAD.

Em termos de resolução e dimensões, o processo apresenta as seguintes capacidades:

- 30µm em construção e 15µm em rasgos,
- Espessura mínima de camada 1µm,
- Resolução lateral entre 3 a 5µm,
- Realização de zonas negativas sem suportes e
- Realização de canais internos.

As aplicações do processo de Micro-Sinterização por Laser dividem-se pela indústria automóvel, moldes, ferramentas, telecomunicações, aplicações médicas e mecânica de precisão. Nas Figuras 2.26 e 2.27 apresentam-se alguns exemplos de modelos obtidos por micro-sinterização.

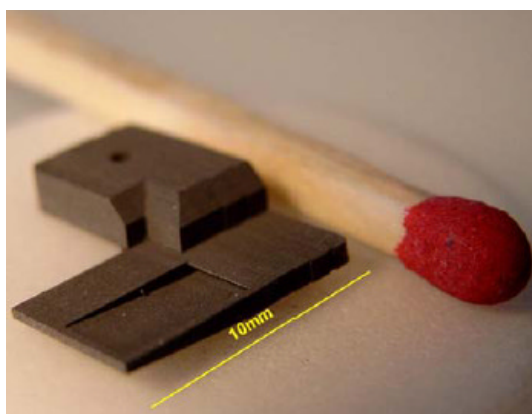


Figura 2.26 – Componente tridimensional [22]

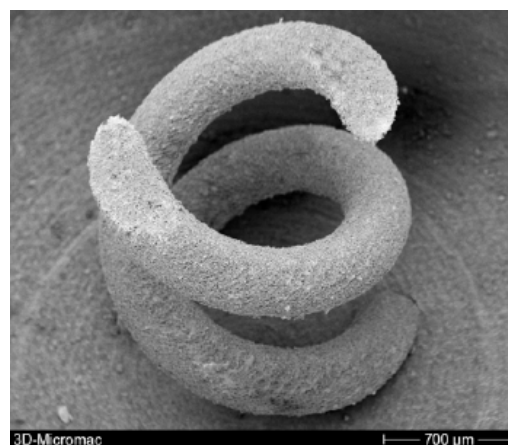


Figura 2.27 – Estrutura em hélice dupla para ilustrar a capacidade de construção sem necessidade de suportes [22]

2.4.7.2. Aplicabilidade da Micro-Sinterização por Laser à Micro-injecção

A aplicabilidade dos componentes obtidos por Micro-Sinterização por Laser ao processo de Micro-injecção é determinada pela sua resistência à fadiga térmica motivada pelas sucessivas alterações de temperatura assim como a resistência à abrasão provocada pela extracção do objecto moldado. O material deverá também ser denso o suficiente para evitar a infiltração do polímero injectado. Com o intuito de validar estas capacidades, foram realizados testes de micro-injecção com insertos obtidos por micro-sinterização, tendo sido obtidos resultados promissores no que se refere à produção em série de micro-componentes [23].



Figura 2.28 – Componente utilizado para os testes de micro-injecção [23]

A Figura 2.28 mostra o inserto sinterizado utilizado nos testes de micro-injecção realizados por Petsch [23]. A geometria é bastante simples, consistindo em três barras transversais sobre uma base rectangular.

A ferramenta permitiu a realização de 500 moldações em Poliacetal Delrin 911P sem mostrar degradação significativa que inviabilizasse a continuação da utilização do inserto.



O material demonstrou possuir uma densidade apropriada para o processo de produção em série utilizado [23].

2.4.8. Micro-Fresagem

Normalmente, para conseguir peças ou zonas moldantes com elevadas razões de dimensões, os processos de eleição são os litográficos. Contudo, estes exigem equipamentos mais dispendiosos e mais etapas intermédias de processamento, cada uma destas interferindo seriamente com as tolerâncias finais da micro-estrutura pretendida [24].

A micro-fresagem surge assim como um processo de corte por arranque de apara mais versátil ao nível microscópico, pela remoção directa de material ainda que com algumas limitações às geometrias realizáveis mas maior versatilidade que a proporcionada pelos processos litográficos.

O processo de micro-fresagem possui duas componentes principais:

- o fabrico de pequenas ferramentas com arestas de corte extremamente afiadas e
- a remoção de material da peça com equipamento de alta precisão e elevada repetibilidade.

As ferramentas para micro-fresagem possuem diâmetros entre 22 e 100 μ m (Figuras 2.29 e 2.30), o que faz com que, à semelhança de qualquer outro processo que utilize uma ferramenta física de corte por revolução, não seja possível criar cantos vivos interiores.

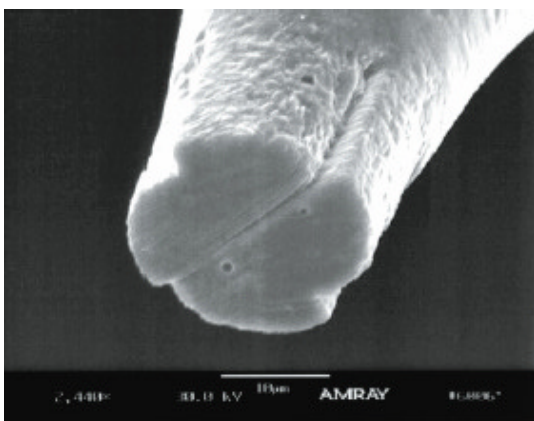


Figura 2.29 – Microfresa de 4 arestas de corte [24]

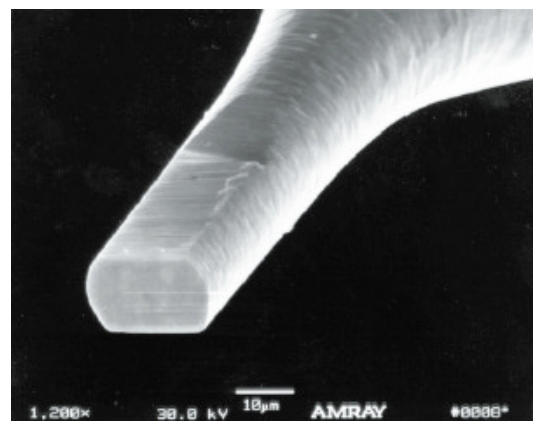


Figura 2.30 – Microfresa de 2 arestas de corte [24]



As principais limitações actuais desta tecnologia são a profundidade máxima de corte de $100\mu\text{m}$ e a menor espessura de parede possível de realizar, que é $8\mu\text{m}$.

Todavia, é um processo rápido quando comparado com os restantes, capaz de gerar paredes perfeitamente verticais, superfícies com baixa rugosidade, cantos exteriores vivos e geometrias relativamente complexas.

2.4.9. Micro-Torneamento

Tal como em termos convencionais, o torneamento é um processo típico para peças de revolução. Em termos microscópicos, este processo (Figura 2.31) encontra-se em estudo, sendo um processo alternativo aos processos litográficos ou de gravação por feixe de iões [25].

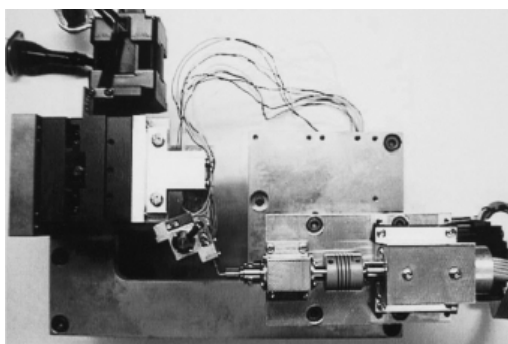


Figura 2.31 – Micro-Torno [25]

Um dos principais problemas associados aos processos de micro-maquinação é que, pelo facto de se pretender fabricar micro-componentes, recorrendo a processos de corte por arranque de apana se exigir a utilização de micro-ferramentas, logo, exigindo também a utilização de um micro-equipamento.

Esta necessidade de miniaturização coloca alguns problemas dado que o manuseamento destes micro-equipamentos tem de ser realizado por um operador humano. Contudo, apesar de todos esses factores, a miniaturização traz benefícios ao nível da minimização de erros, os quais podem ser devidos a expansões térmicas ou a flexão da peça em fabrico provocada pelas forças de corte em causa, que são bastante menores pelo facto de ser utilizada uma micro-ferramenta [25].



No entanto, não é possível obter ferramentas de dimensões tão diminutas quanto seria desejável, razão pela qual a precisão do processo é seriamente afectada pelo conjunto de forças em jogo, considerando também a diminuição de rigidez da peça em fabrico com a diminuição do seu diâmetro.

No que se refere à rugosidade, é possível obter valores R_{max} de $1\mu\text{m}$ em operações de contorno. Em operações de abertura de rasgos são observáveis valores maiores de rugosidade, devidos à fricção da peça com a ferramenta, provocada por velocidades de corte insuficientes [25].

Estudos das forças de corte a várias velocidades de corte, em micro-torneamento, levaram à conclusão de que a intensidade das forças de corte diminui com o aumento da velocidade de corte [25].

O processo possibilita as mesmas operações que podem ser executadas no torneamento convencional, facejamento, torneamento do contorno (Figura 2.32), abertura de rasgos (Figura 2.33) e roscas (Figura 2.34) assim como a furação.

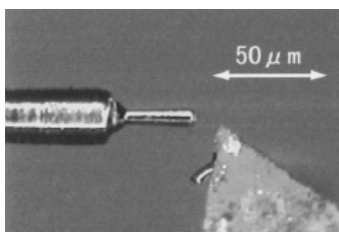


Figura 2.32 – Torneamento de contorno [25]

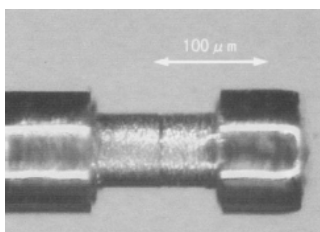


Figura 2.33 – Abertura de rasgos [25]

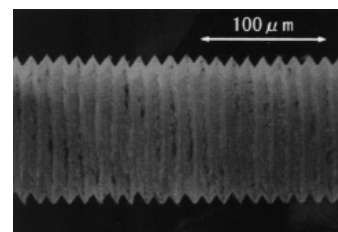


Figura 2.34 – Execução de roscas [25]

2.4.10. Micro-Furação

Este processo, cujas aplicações se centram essencialmente na micro-electrónica, tem pouca relevância no contexto da micro-injecção. A razão de aspecto para os furos que se podem realizar são tipicamente na ordem dos 10:1, para furos cujo diâmetro mínimo será de $0,1\text{mm}$ [26].



Para este tipo de processo, a relação comprimento/diâmetro da broca nunca pode ser muito superior à razão de aspecto já descrita para o processo em si, dados os problemas de deflexão da ferramenta.

A esbelteza necessária à ferramenta inviabiliza a sua utilização em materiais mais duros, como os metais, assim como ao tipo de esforços a que esta pode ser sujeita, tornando este processo inapto para grandes produções em série.

2.4.11. Micro-EDM

À semelhança do processo de electroerosão (EDM - Electric Discharge Machining) convencional, a micro-EDM consegue realizar geometrias verdadeiramente 3D, desde que disponha de eléctrodos com a geometria inversa daquela que se pretende obter [27]. É neste capítulo em particular que se verifica a articulação entre este processo e outros processos de obtenção de micro-componentes como, por exemplo, processos litográficos conjugados com a electrodeposição de material condutor [28]. O micro-componente obtido, caso não seja realizado em material condutor, pode ser revestido permitindo a sua utilização após revestimento com material condutor como eléctrodo.

O princípio de funcionamento da micro-EDM baseia-se na remoção de material através da erosão provocada por descargas eléctricas sobre a peça. A peça e o eléctrodo estão separados por líquido dieléctrico que, inicialmente, não é condutor. Quando a peça e o eléctrodo se aproximam, o líquido dieléctrico torna-se subitamente condutor, permitindo a ocorrência de descargas eléctricas. A energia térmica libertada é utilizada para a fusão e evaporação do material. Na Figura 2.35 apresenta-se um equipamento de micro-EDM.

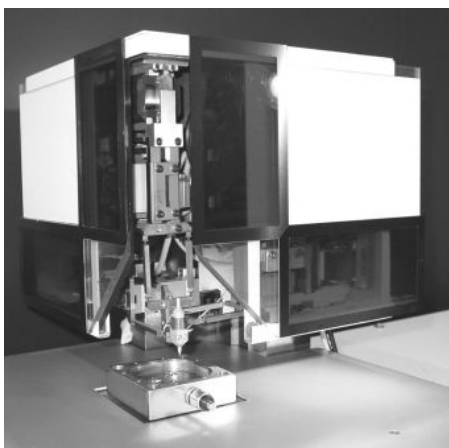


Figura 2.35 – Equipamento de Micro-EDM [29]

Os principais parâmetros do processo são o impulso, a taxa de impulsos, a polaridade aplicada, o material utilizado para o eléctrodo, o líquido dieléctrico, o gap e a evacuação das partículas erodidas. O impulso possui parâmetros próprios como a tensão, a corrente e a duração deste, controlando desta forma o tamanho da cratera erodida na peça.

A taxa de impulsos influencia a taxa de remoção de material e deve permitir o tempo suficiente para que o dieléctrico desionize e que as partículas erodidas sejam evacuadas.

A polaridade utilizada define se o eléctrodo é o cátodo ou o ânodo:

- Polaridade positiva: o pólo positivo é ligado à peça e o pólo negativo é ligado ao eléctrodo. Nesta situação obtém-se menor desgaste do eléctrodo e melhor qualidade das superfícies erodidas.
- Polaridade negativa: o pólo negativo é ligado à peça e o pólo positivo é ligado ao eléctrodo. Nesta situação obtém-se maior desgaste do eléctrodo, menor qualidade das superfícies erodidas e maior taxa de remoção de material.

O valor da folga entre cavidade e eléctrodo (*gap*) depende fortemente do binómio tensão/corrente e do tipo de operação que se está a realizar, esta folga apresenta valores maiores em desgaste e valores menores em acabamento.

No caso particular da micro-EDM, a evacuação das partículas erodidas pode trazer dificuldades devido aos reduzidos valores que a folga pode ter. Em folgas de valores inferiores a $3\mu\text{m}$, a circulação de líquido dieléctrico torna-se extremamente difícil.

A eficiência do processo micro-EDM pode ser incrementada com a introdução de ultra-sons (Figura 2.36) [30]. O ultra-som é uma onda sonora com uma frequência superior a 20kHz,



gerada pela aplicação de uma corrente eléctrica a um cristal piezoeléctrico, incorporado no transdutor da cabeça do sonótrodo. Este cristal contrai e dilata à mesma frequência a que a corrente muda a sua polaridade. O campo sonoro gerado pelo cristal faz com que as moléculas nele contidas vibrem e oscilem. Como todos os sólidos e líquidos consistem em moléculas mantidas juntas por forças elásticas, estas ligam cada molécula a todas as moléculas vizinhas.

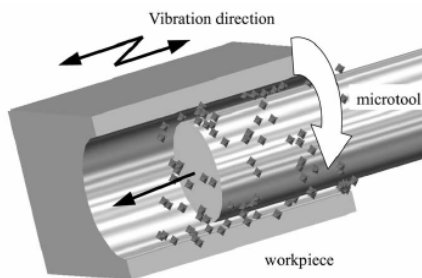


Figura 2.36 – Representação do processo Micro-EDM assistido por Ultra-Sons [31]

Se uma molécula vibrar, fará com que todas as moléculas a ela ligadas vibrem também e assim sucessivamente até que a vibração se propague por todo o corpo. Quando o eléctrodo é sujeito a este tipo de vibração, o fluxo de dieléctrico é substancialmente melhorado e a qualidade da superfície maquinada é claramente superior.

2.4.11.1. Micro-Furação EDM por Eléctrodo Rotativo

Este processo de furação possui as mesmas características associadas ao processo micro-EDM, sendo por isso aplicável a materiais duros e difíceis de processar (Figura 2.37) [32].

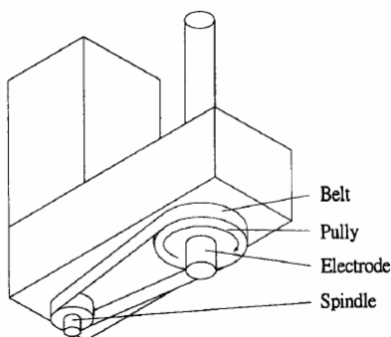


Figura 2.37 – Diagrama esquemático para a rotação do eléctrodo no processo de Micro-Furação EDM por Eléctrodo Rotativo [32]

Sendo um processo de furação, um dos factores importantes a ter em conta é a relação comprimento/diâmetro do furo, o que influencia fortemente a escolha do material adequado para o eléctrodo. Para relações comprimento/diâmetro elevadas, não é possível utilizar eléctrodos de cobre, sendo necessário recorrer a outros materiais com melhores características de resistência ao desgaste, aos efeitos da temperatura e maior rigidez, características estas que podem ser encontradas no carboneto de tungsténio.



Outro efeito importante é a polaridade utilizada no processo. Tal como no processo EDM convencional, a escolha da polaridade influencia a qualidade e a rapidez do processo.

A principal vantagem associada à utilização de um eléctrodo rotativo é o aumento da qualidade do processo e da taxa de remoção de material.

Estudos sobre o processo [32], permitiram concluir que:

- Em polaridade negativa, obtêm-se maiores taxas de remoção de material mas com maiores desgastes no eléctrodo.
- A qualidade do processo é melhorada substancialmente pela rotação do eléctrodo.
- Em polaridade positiva, a qualidade do furo é melhor, obtendo melhores tolerâncias e menos desgaste por parte do eléctrodo.

2.4.12. Micro-WEDM

Tal como na electroerosão por fio convencional, a Micro-WEDM consegue apenas realizar geometrias $2^{1/2}D$, ainda que esta definição possa ser algo redutora para as capacidades que o processo oferece, devido às inclinações possíveis que o fio pode assumir.



Figura 2.38 – Equipamento de Micro-WEDM Agie Excellence 2F [33]

A oferta comercial actual de equipamentos para micro-WEDM (Figura 2.38) utiliza fios com diâmetros na ordem dos $25\mu\text{m}$ e permitem uma precisão de posicionamento de $\pm 1,5\mu\text{m}$ [33].

O controlo apurado do processo, no que se refere a todos os parâmetros, pode permitir a obtenção de folgas abaixo dos $3\mu\text{m}$ com raios mínimos de $16\mu\text{m}$ e uma rugosidade R_A nas paredes laterais de $0,1\mu\text{m}$.



Como vantagens relativamente ao processo micro-EDM por penetração, podem referir-se a circulação contínua de fio, que elimina o efeito de desgaste do eléctrodo e a melhor evacuação de partículas, que aumenta a qualidade do processo.

O processo micro-WEDM permite obter componentes com elevada razão de aspecto com paredes perfeitamente perpendiculares e de baixa rugosidade.

A vantagem inerente a todos os processos EDM é a possibilidade de maquinar directamente o material final do componente, com precisões comparáveis aos processos litográficos. Estes, pelo facto de requererem etapas intermédias até atingir o objectivo final, fazem com que a precisão proporcionada originalmente se perca ao longo do processo.



2.5. Processos Indirectos

Descrevem-se em seguida alguns dos principais processos de micro-fabricação classificados anteriormente como processos indirectos, ou seja, aqueles que dependem de operações posteriores para serem utilizados como ferramenta para um processo de produção em série.

2.5.1. Gravação por Radiação Directa do Sincrotrão

O processo LIGA foi desenvolvido com o objectivo de produzir componentes de elevada razão de aspecto a partir de polímeros ou metais. Contudo, polímeros como o Poli-Tetrafluoroetileno (PTFE), o *Perfluoroalkoxy* (PFA), o *FluoroEthylkene Polymer* (FEP) e alguns cristais ópticos como o NaCl e o LiF não podem ser processados deste modo, dado serem materiais transparentes dentro do espectro infravermelho e ultravioleta. Alguns processos de ablação laser foram tentados com estes materiais mas não foram conseguidas razões de dimensões significativas nas peças obtidas (tipicamente inferiores a 1) [34].

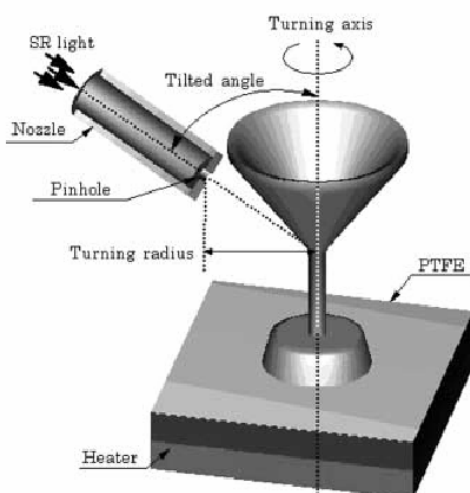


Figura 2.39 – Diagrama esquemático do processo de gravação por radiação directa do sincrotrão [34]

Para estes materiais, foram desenvolvidas técnicas de gravação directa (Figura 2.39), com recurso a raios-X e sem utilizar um componente revelador no material de suporte. Este processo pode ocorrer em câmara de vácuo ou em atmosfera controlada, com temperatura igualmente controlada. Os estudos conduzidos por Katoh [35] mostraram que a qualidade das superfícies obtidas era bastante superior quando o material era aquecido, quando comparado com a realização do processo à temperatura ambiente.



Considerando que o processo utiliza a exposição directa, sem máscara e recorrendo à oscilação do material a processar, alterando-lhe o ângulo de incidência do feixe de radiação, poderá realizar micro-estruturas 3D com paredes laterais inclinadas ou curvas, o que dá um potencial enorme à evolução do processo.

A taxa de gravação do PTFE em vácuo, utilizando a radiação do sincrotrão, é de 100µm/min e a maior razão de aspecto possível de atingir para este material é superior a 50:1.

Tal como no processo LIGA, este processo de gravação directa também pode ser combinado com um processo posterior de electrodeposição de metal de modo a obter um micro-componente metálico ou uma zona moldante apta para o processo de micro-injecção.

O processo de Gravação Directa por Radiação do Sincrotrão não necessita de raios-X de elevada intensidade pelo que pode ser utilizada uma fonte de radiação mais compacta do que aquela necessária para o processo LIGA. Por esse motivo e pela taxa de gravação mais elevada que o processo consegue, este possui um custo de utilização mais reduzido, o que o pode tornar mais apetecível para aplicações industriais [35].

2.5.2. Ablação Laser

Neste processo, são utilizados impulsos de elevada potência de laser para vaporizar a matéria de uma superfície alvo, elevando a temperatura desta a mais de 2000°C. Como resultado, é ejectada na normal a essa superfície uma nuvem de partículas. Essa nuvem de partículas desloca-se a velocidades elevadíssimas, expande-se para longe do alvo e as suas partículas vão condensar-se no substrato colocado em frente à superfície alvo [36].

O processo de ablação ocorre numa câmara de vácuo, em atmosfera controlada (Figura 2.40), onde se encontra também o substrato, cuja temperatura deve ser elevada, cerca de 700 a 800°C, e uniforme ao longo de toda a sua área. É um processo tipicamente aplicado a



polímeros, em que a remoção de material se dá através da quebra de ligações químicas entre as macromoléculas, dispersando-se sob a forma de gás ou de pequenas partículas.

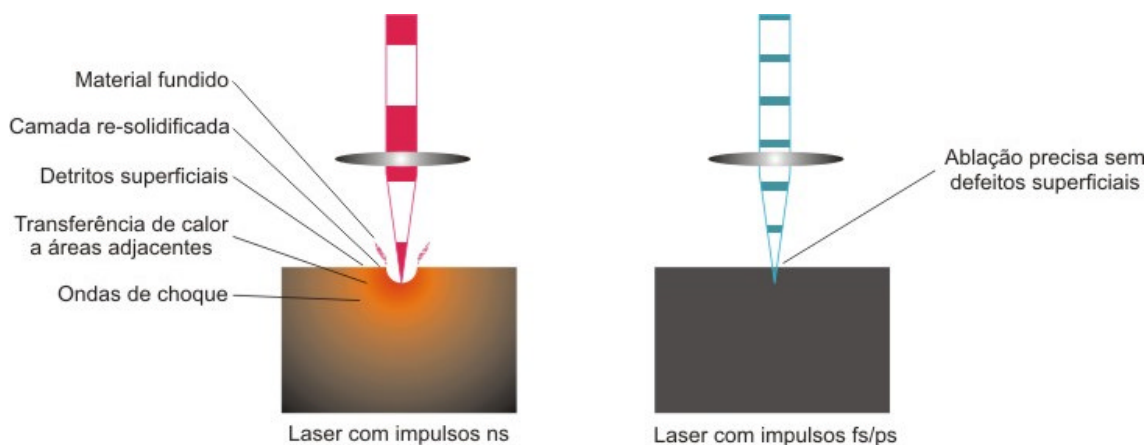


Figura 2.40 – Impulsos de alguns nanosegundos versus impulsos de alguns femto ou picosegundos

Esta técnica é bastante útil na obtenção de micro-componentes e/ou micro-estruturas, necessitando contudo, de impulsos laser de elevada frequência para minimizar defeitos superficiais devido a fenómenos indesejados de transferência de calor para as áreas adjacentes às que são processadas.

As áreas são processadas por feixe laser orientado por espelhos galvanométricos ou pela movimentação da peça em processamento segundo os eixos x, y e z.

As capacidades actuais desta tecnologia, utilizando lasers de excímeros possibilitam a ablação de materiais para a obtenção de micro-estruturas com tolerâncias de $\pm 1\mu\text{m}$ e uma rugosidade R_a $0.31\mu\text{m}$ [36].

2.5.3. Micro-estereolitografia

A estereolitografia [37], tecnologia utilizada industrialmente desde o final da década de 80, baseia-se na construção de modelos camada a camada através da polimerização de uma resina fotosensível por meio de luz UV.



Os principais processos comerciais utilizam-se lasers como fontes de radiação e mecanismos de polimerização ponto por ponto. Esta tem sido também a estratégia adoptada por alguns sistemas de micro-estereolitografia (Figuras 2.41 e 2.42).

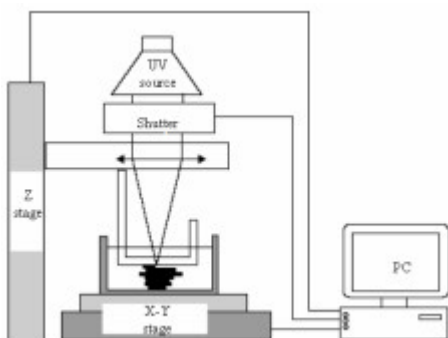


Figura 2.41 – Técnica de Superfície Constrangida de Resina [38]

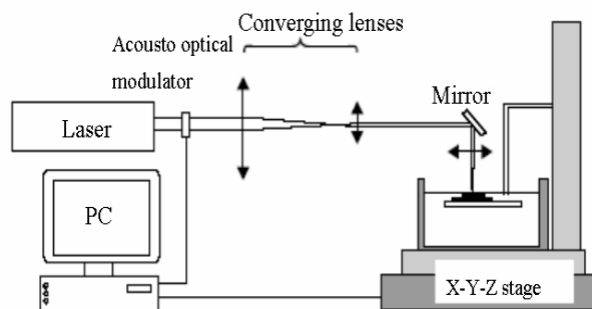


Figura 2.42 – Técnica de Superfície de Resina Livre [38]

A procura por técnicas mais eficientes, que conduzam a resoluções mais elevadas, a uma melhor focagem do feixe de luz UV e à maior rapidez de processamento levou ao desenvolvimento de novas estratégias de fabricação por micro-estereolitografia [38].

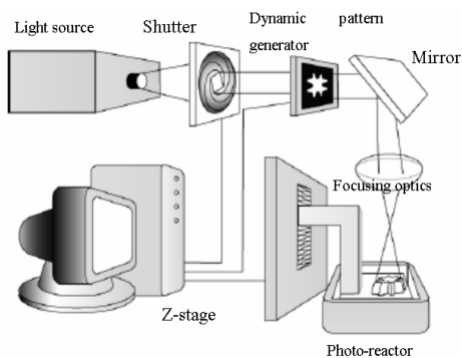


Figura 2.43 – Técnica de Exposição Integral [38]

Um dos desenvolvimentos mais recentes e aparentemente bastante promissor, consiste na projecção de um feixe de luz UV com a imagem integral de uma camada completa através de um painel de cristais líquidos controlado dinamicamente e que irradiará de uma só vez uma camada de resina (Figura 2.43). Desta forma, reduz-se imenso o tempo de processamento quando comparado com a técnica clássica de varrimento.

Após a construção do modelo, este é retirado da plataforma de trabalho e lavado com solvente apropriado, não sendo necessária qualquer operação posterior de pós-cura.



O modelo obtido pode então ser revestido e utilizado como as peças obtidas pelo processo LIGA e seus derivados. A qualidade superficial das paredes laterais das peças depende da espessura da camada mas também do tipo de geometria. Habitualmente, são utilizadas espessuras de camada na ordem dos $5\mu\text{m}$. A exposição por imagem integral garante uma óptima qualidade das paredes quando estas são perfeitamente verticais, contudo, se estas forem inclinadas ou curvas, aparece o efeito de degrau nas paredes laterais.

Ao contrário do que acontece nos processos de estereolitografia convencionais, neste processo não há lugar à criação de suportes em geometrias negativas e isto acontece dada a certeza de danificar a peça ao remover tais suportes, o que limita a complexidade das peças que podem ser obtidas por este processo.

Apesar da resolução deste processo não ser tão boa quanto aquela que é proporcionada pelos restantes processos de micro-fabricação possui, ainda assim, vantagens significativas:

- As peças podem ser verdadeiramente 3D e com geometrias complexas
- Os tempos de obtenção de peças são relativamente curtos, dada a técnica de exposição utilizada (podem ser realizadas entre 1 até 5 camadas por minuto, independentemente da sua complexidade).
- A espessura máxima de camada é de aproximadamente $10\mu\text{m}$, com uma precisão na imagem projectada de $10\mu\text{m}$. Para os actuais sistemas, os objectos construídos podem ter dimensões máximas de $10 \times 7\text{mm}$ até vários milímetros de altura. O tempo de realização de cada camada é condicionado pelo tempo de exposição (cerca de 7 segundos) e pelo tempo de regularização da superfície da resina.

Nas Figuras 2.44 e 2.45 apresentam-se alguns modelos construídos por micro-estereolitografia.

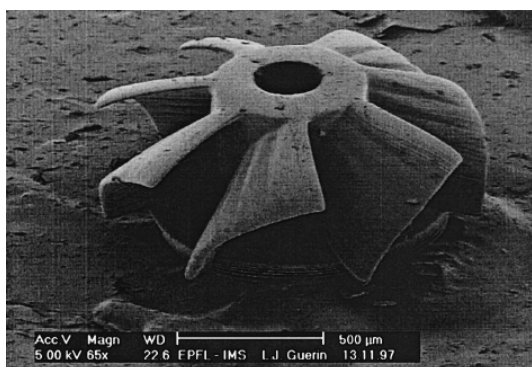


Figura 2.44 – Microrotor obtido por MicroEstereolitografia [37]

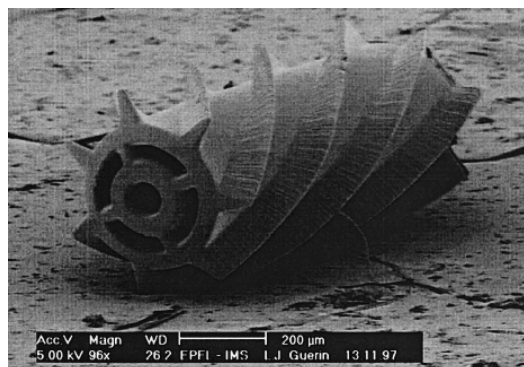


Figura 2.45 – Microroda dentada helicoidal obtida por MicroEstereolitografia [37]

2.5.4. Fotopolimerização Bi-Fotónica

A polimerização bi-fotónica de polímeros híbridos fotosensíveis é uma técnica bastante promissora para a fabricação de micro e nano-estruturas tridimensionais complexas.

As moléculas do polímero híbrido recebem dois fótons em vez de apenas um, sendo excitadas para estados de energia mais elevados (ver Anexo A1) [39].

Dado que a maioria dos monómeros ou pré-polímeros não produzem espécies iniciadoras quando sujeitas a exposição de luz, é necessário introduzir moléculas de baixo peso molecular (iniciadores) que irão iniciar a polimerização através de processos fotoquímicos ou fotofísicos.

Quando uma molécula absorve luz, os electrões são colocados em movimento pelo campo eléctrico oscilante da luz. À medida que os fótons incidentes transferem a sua energia para a molécula, um electrão de valência pode ser movido da orbital molecular de maior valor energético para outra não ocupada, com a formação de uma molécula excitada em estado singuleto (situação em que não ocorre inversão de *spin* dos electrões). Contudo, esta molécula excitada é uma espécie de vida muito curta (menos de 10^{-8} s) que desaparece devido a diversos processos concorrentes, dissipando a energia de excitação. Podem ser identificados dois tipos de processos de dissipação de energia, tal como se indica na Figura 2.46 [40]:

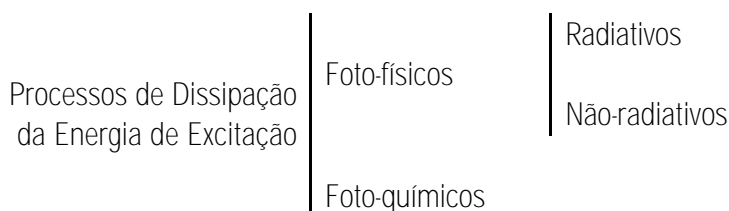


Figura 2.46 – Processos de dissipação de energia de excitação de uma molécula [40]

Os mecanismos radiativos envolvem a absorção de um fóton por uma molécula em estado fundamental (S_0) e a emissão de um fóton a partir de um estado excitado electronicamente excitado, quer por:

- Fluorescência (relaxação de um estado de excitação com a mesma multiplicidade de *spin* que o estado fundamental)
- Fosforescência (relaxação de um estado de excitação com diferente multiplicidade de *spin* do estado fundamental)

Os processos não-radiativos incluem conversão interna e cruzamento entre sistemas, que ocorre entre estados com diferentes multiplicidades de *spin*, gerando estados excitados designados por tripleto.

Os processos foto-químicos ocorridos durante a transformação da molécula inicial incluem processos de cisão, reacções de transferência de electrões, abstracção do hidrogénio, entre outros. Devido ao curto tempo de vida da molécula em estado singuleto, muitas das reacções fotoquímicas ocorrem apenas através de estados excitados tripleto que possuem maior longevidade (maior que 10^{-6} s).

A emissão de impulsos laser com a duração de 10^{-12} segundos no comprimento de onda do infravermelho conjugada com a utilização de uma resina fotosensível mas transparente nesse mesmo comprimento de onda permite a fotopolimerização localizada, não apenas na superfície desta como também no seu núcleo. Assim, torna-se possível a polimerização de qualquer



parcela do seu volume devido à dependência quadrática da taxa de absorção da intensidade do laser existente na polimerização bi-fotónica

A foto-polimerização bi-fotónica utiliza impulsos laser ultra-curtos, focados com elevada precisão numa parcela de volume (voxel) da resina líquida.

A foto-polimerização bi-fotónica (Figura 2.47) utiliza habitualmente Lasers Titânio:Safira, com as seguintes características:

- frequência de impulso: 80MHz
- duração de impulso: 80fs
- comprimento de Onda: 810nm
- resolução espacial: >100nm

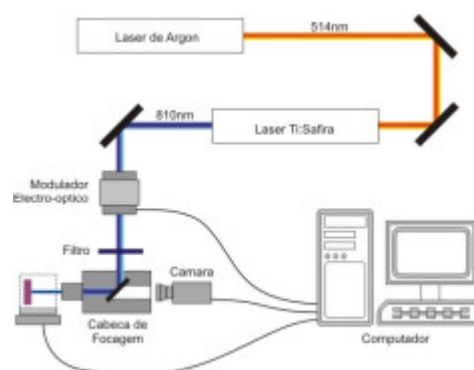


Figura 2.47 – Diagrama esquemático do processo de Foto-polimerização Bi-Fotónica

O material mais utilizado nesta técnica é um composto híbrido designado por ORMOCER[®], abreviatura em inglês para ORganic MOdified CERamic. Trata-se de um material que apresenta as seguintes características [41]:

- Elevada transparência óptica
- Excelentes propriedades térmicas e mecânicas
- Elevada resistência química
- Custo acessível

O ORMOCER[®] possui óptimas propriedades físicas e químicas, o que se deve essencialmente à ausência de porosidades que melhoram simultaneamente as suas propriedades mecânicas, ópticas e assim protege o material contra o ataque químico ou fotoquímico que lhe reduziria a vida útil.

Para além do ORMOCER[®], o HPEA – Hyperbranched PolyEster Acrylate é também um material utilizado neste processo [42].



Nas Figuras 2.48 e 2.49 ilustram-se dois exemplos de micro-modelos criados por foto-polimerização bi-fotónica.

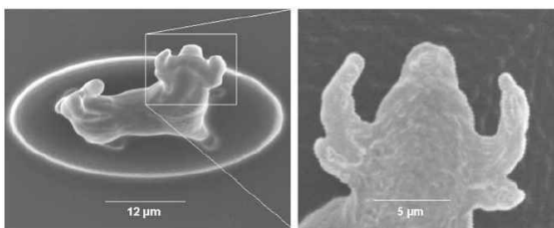


Figura 2.48 – Imagens ampliadas de um micro-“touro” obtido por foto-polimerização bi-fotónica [43]

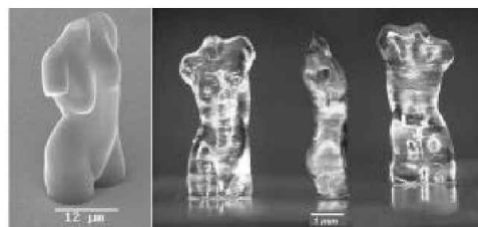


Figura 2.49 – Imagens ampliadas de uma micro-“Vénus” obtida por foto-polimerização bi-fotónica [43]



2.6. Processos Híbridos

Os processos denominados por híbridos compreendem a utilização de técnicas de remoção e adição de material, tipicamente, com o objectivo de obtenção de geometrias complexas ou de conjuntos de componentes já pré-montados. Atendendo ao objectivo de produção de micro-sistemas e/ou micro-componentes, em seguida, apresenta-se um dos processos mais promissores neste sub-domínio da micro-fabricação.

2.6.1. Processo UPSAMS

O acrónimo UPSAMS é a sigla em inglês para UltraPrecision Manufacturing of Self Assembled Micro Systems, ou seja, Fabricação Ultra-precisa para Microsistemas Auto-montados. Esta técnica combina processos de micro-maquinação com um processo de deposição de material estrutural e de material que irá ser sacrificado [44].

Esta combinação possui as vantagens somadas dos processos fotolitográficos e as dos processos de maquinação de ultra-precisão, permitindo a obtenção de micro-sistemas auto-montados de componentes verdadeiramente 3D.

As principais fases do processo são (Figura 2.50):

- O material que vai servir de apoio e que será posteriormente sacrificado é depositado sobre uma base.
- É maquinada nesse material uma das metades da peça, deixando uma cavidade com o negativo de metade da peça que se pretende obter.
- É depositado o material estrutural que vai constituir a peça final a obter.
- O material estrutural vai ser então maquinado de forma a obter a outra metade da peça final.
- O material a sacrificar que serviu de suporte para maquinar o material estrutural vai ser removido, deixando apenas a peça final em material estrutural.

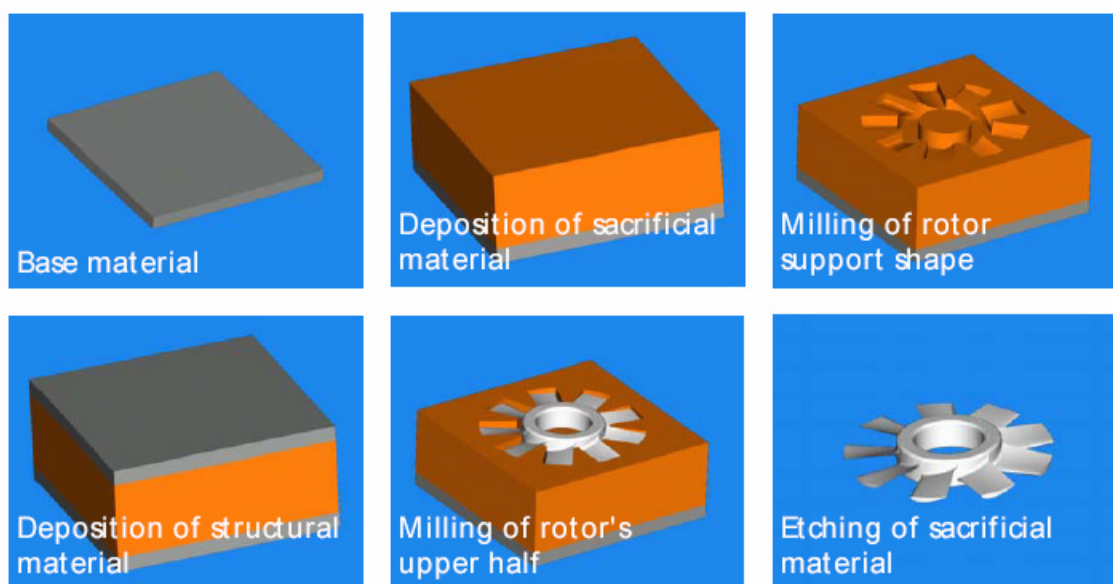


Figura 2.50 – Fases do processo UPSAMS [44]

O processo UPSAMS permite, relativamente a outros processos, a obtenção de geometrias complexas, a possibilidade de obter micro-sistemas já montados e apresenta poucas limitações quanto aos materiais que podem ser utilizados.

A combinação de outros processos verificada no UPSAMS permite superar algumas das limitações impostas pelos processos litográficos. O processo é perfeitamente apto para pequenas/médias séries de produção ou para a produção de protótipos, dado que não necessita de máscaras. As técnicas de micro-maquinação por corte com ferramentas diamantadas utilizadas nesta estratégia de fabricação conseguem tolerâncias abaixo do micrómetro, possibilitando paredes com rugosidades R_a inferiores a 4nm.

Como materiais finais para os componentes, podem ser utilizados o níquel, o alumínio, o cobre e algumas das suas ligas.

Como material de suporte e que será mais tarde sacrificado, pode ser utilizado o cobre ou uma resina epoxídica.

As Figuras 2.51 e 2.52 apresentam um modelo de um micro-rotor obtido pelo processo UPSAMS, exemplo esse, cujas fases de fabrico foram já ilustrados na Figura 2.50.



Figura 2.51 – Imagem de um rotor obtido pelo processo UPSAMS [44]

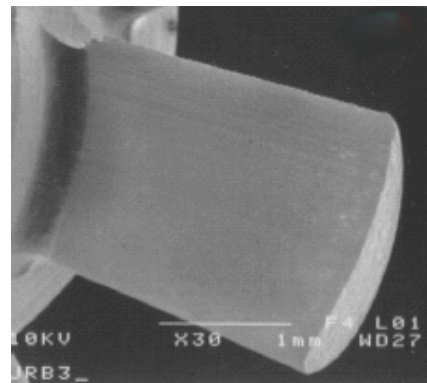


Figura 2.52 – Imagem de uma das pás do rotor [44]



2.7. Análise comparativa entre Processos de Micro-Fabricação

De entre todas as técnicas associadas à produção de micro-componentes, foi feita a sua distinção entre processos directos e indirectos, tendo em vista a utilização dos componentes obtidos como zonas moldantes para o processo de micro-injecção. A Tabela 2.2 faz um resumo dos processos, comparando as suas potencialidades assim como a sua adequação a um processo de produção em série.

Tabela 2.2 – Comparativo de capacidades entre todos os processos de Micro-Fabricação, estabelecendo a distinção entre aqueles considerados directos e indirectos, de acordo com os critérios definidos em 2.3.2.

	Processos de Micro-Fabricação	Geometria	Razão de Aspecto	Dimensão Mínima	Precisão	Rugosidade
Indirectos	Gravação por Radiação Directa do Síncrotrão	3D	50:1	2-5µm	n/d	<4µm
	Ablação Laser	3D	10:1	n/d	2-5µm	2-3µm
	Micro-estereolitografia	3D	n/d	n/d	10µm	10µm
	Foto-Polimerização Bi-Fotónica	3D	n/d	n/d	n/d	n/d
Directos	LIGA Raio-X	2 ^{1/2} D(3D)	100:1	n/d	1µm	n/d
	LIGA-UV	2 ^{1/2} D(3D)	20:1	n/d	n/d	n/d
	LIGA-Feixe de Iões	2 ^{1/2} D(3D)	40:1	3µm	0,1µm	R _A 10nm
	LIGA-Laser	2 ^{1/2} D(3D)	10:1	n/d	n/d	n/d
	<i>Laser Milling</i>	3D	10:1	n/d	n/d	n/d
	Gravação por Feixe Iões	3D	50:1	3µm	0,1µm	R _A 10nm
	Micro-Fresagem	3D	>10:1	8µm	n/d	n/d
	Micro-Torneamento	2D	n/d	8µm	1µm	R _{max} 1µm
	Micro-Furação	1D	<10:1	n/d	n/d	n/d
	Micro-EDM	3D	n/d	n/d	n/d	n/d
	Micro-Furação EDM	2D	n/d	n/d	n/d	n/d
	Micro-WEDM	2 ^{1/2} D(3D)	n/d	16µm	±1,5µm	R _A <1µm
	Micro-sinterização laser	3D	12:1	30µm	n/d	R _A 1,5µm
	UPSAMS	3D	n/d	n/d	n/d	R _A 4nm

No critério “Geometria” da Tabela 2.2 foi realizada a distinção entre geometrias 2^{1/2}D e 3D. Tal justifica-se pelo facto de alguns dos processos permitirem a realização de estruturas totalmente



3D mas recorrendo a técnicas de exposição especiais, o que onera o processo. Entenda-se por uma estrutura a duas dimensões e meia aquela cuja geometria da secção é constante ao longo da altura e cuja geratriz é constante, não sendo por isso uma estrutura verdadeiramente 3D.

A tabela anterior (Tabela 2.2) reflecte as capacidades/limitações dos processos em estudo. Contudo, outro dos factores igualmente estudado em cada um dos processos - o custo associado à sua utilização - não é aqui abordado do ponto de vista quantitativo.

Ainda que não seja possível obter dados concretos para todos os processos, é razoável estabelecer qualitativamente uma ponderação que possibilite atribuir factores de custos associados às fontes de energia e às etapas intermédias inerentes a cada processo (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Comparativo de fontes de energia, acessibilidade, tempo de processamento e custos entre todos os processos de Micro-Fabricação, estabelecendo a distinção entre aqueles considerados directos e indirectos, de acordo com os critérios definidos em 2.3.2.

	Processos de Micro-Fabricação	Fonte de Energia	Acessibilidade do Processo	Tempo de Execução	Custo de Utilização
Indirectos	Gravação por Radiação Directa do Sincrotrão	Sincrotrão	Reduzida	Médio	Elevado
	Ablação Laser	Laser	Elevada	Reduzido	Reduzido
	Micro-estereolitografia	Luz UV	Reduzida	Médio	Médio
	Foto-Polimerização	Laser	Reduzida	Médio	Médio
	Bi-Fotónica	Bi-Fotónico	Reduzida	Médio	Médio
Directos	LIGA Raio-X	Sincrotrão	Reduzida	Médio	Elevado
	LIGA-UV	Luz UV	Elevada	Elevado	Médio
	LIGA-Feixe de Iões	Acelerador de electrões	Média	Médio	Médio
	LIGA-Laser	Laser	Média	Médio	Médio
	<i>Laser Milling</i>	Laser	Elevada	Reduzido	Médio
	Gravação por Feixe Iões	Acelerador de electrões	Média	Reduzido	Médio
	Micro-Fresagem	Electricidade	Média	Médio	Reduzido
	Micro-Torneamento	Electricidade	Média	Médio	Reduzido
	Micro-Furação	Electricidade	Média	Médio	Reduzido
	Micro-EDM	Electricidade	Elevada	Médio	Reduzido
	Micro-Furação EDM	Electricidade	Média	Médio	Reduzido
	Micro-WEDM	Electricidade	Elevada	Médio	Reduzido
	Micro-sinterização Laser	Laser	Média	Reduzido	Médio
UPSAMS	Electricidade	Reduzida	Médio	Médio	



De forma a melhor se compreenderem algumas das classificações efectuadas na Tabela 2.3 é necessário esclarecer a forma como alguns dos critérios de classificação foram interpretados.

- Fonte de energia: A fonte de energia utilizada por cada processo reflecte-se muito não apenas nos custos de utilização mas também na acessibilidade ao processo. Os processos que utilizam radiação raio-X são exemplo disso, dada a pouca disponibilidade de sincrotrões para uso como fonte de energia. A electricidade certamente será utilizada por todos os processos mas é referida apenas como fonte principal de energia para aqueles processos em que apenas alimenta dispositivos mecânicos, electromecânicos e/ou ópticos, necessários para o processo.
- Acessibilidade ao processo: Por acessibilidade, entenda-se neste caso como a disponibilidade de determinado processo em termos comerciais. Todos os processos de micro-fabricação aqui citados existem, muito embora alguns ainda não tenham chegado ao mercado, por se encontrarem ainda em desenvolvimento.
- Tempo de execução: Este parâmetro pretende estabelecer em termos relativos a maior ou menor rapidez que cada um dos processos proporciona. Os valores atribuídos são estimativos e inferidos a partir da bibliografia.
- Custo de utilização: Os custos associados a cada processo dependem não apenas da fonte de energia utilizada mas também dos materiais utilizados. Os custos atribuídos aos processos não contemplam custos de aquisição de equipamentos e apenas pretendem estimar o custo do serviço prestado pela utilização do processo.



2.7.1. Critérios de Selecção dos Processos de Fabricação

O critério que preside a esta selecção é indubitavelmente a dimensão do micro-componente e a razão de aspecto para ele pretendida. Contudo, torna-se inevitável o recurso a critérios de ordem económica para o estabelecimento de um compromisso entre o processo adequado para a aplicação pretendida e a sua implicação nos seus custos de produção.

Se o micro-componente ou micro-estrutura tiver como destino a utilização como ferramenta de produção em série, o seu custo poderá ser diluído na produção subsequente e então deverá ser tido em conta outro critério importante que será a sua vida útil durante esse processo de produção.

A aplicação de metodologias decisionais à selecção deste tipo de processos deve, contudo, ser condicionada pela aplicação final para a qual o micro-componente ou micro-estrutura foi projectado, ou seja, aplicações diferentes deverão ter critérios diferentes para a selecção do processo mais apto.

O método de selecção ou seriação dos processos deverá então compreender não apenas a relevância das características de cada processo para a aplicação em causa como também a importância relativa entre características do mesmo processo.

2.7.1.1. Metodologia de seriação de processos para uma aplicação

A técnica de seriação AHP (Analytical Hierarchy Process) é uma ferramenta importante para uma selecção deste tipo uma vez que permite definir prioridades dentro de uma organização ou processo, hierarquizando-as relativamente umas às outras [45].

A técnica pode ser aqui introduzida se for considerado que é necessário definir quais os parâmetros mais relevantes para uma dada aplicação, relacionando-os e estabelecendo a importância relativa entre cada par de parâmetros, classificada de 1 (Pouco Importante) a 3 (Muito Importante), tal como se descreve na Tabela 2.4.



Tabela 2.4 – AHP aplicado às características dos processos de microfabricação para a produção de microcomponentes.

Directo?	Geometria	Razão de Aspecto	Dimensão Mínima	Precisão	Rugosidade	Fonte de Energia	Acessibilidade do Processo	Tempo de Execução	Custo de Utilização
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	A 1	C 2	D 2	E 2	F 2	G 1	H 3	I 3	J 3
		C 1	B 1	E 3	B 1	B 2	H 1	I 1	B 1
			C 3	C 2	C 2	C 3	H 1	I 1	C 1
				D 1	F 1	D 2	D 1	I 2	D 1
					E 1	E 3	H 1	I 1	E 1
						F 2	H 1	I 1	F 1
							G 3	G 3	G 3
								H 1	H 2
									J 3

1	Pouco Importante
2	Média Importância
3	Muito Importante

A hierarquização de características é realizada comparando cada par de características e estabelecendo dentro desse par, qual a característica mais relevante para a aplicação. A ponderação da importância relativa entre duas características auxilia o estabelecimento da hierarquia pretendida.

Somando as quantidades de características prioritárias definidas na Tabela 2.4 e afectando-as da respectiva ponderação, obtém-se um quadro de classificação da importância destas características para a aplicação em estudo (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 – Classificação das características em função das prioridades definidas.

Características em análise	Soma	Ponderação
C Razão de Aspecto	14	17,9
E Precisão	10	12,8
G Fonte de Energia	10	12,8
H Acessibilidade do Processo	10	12,8
I Tempo de Execução	9	11,5
D Dimensão Mínima	7	9,0
F Rugosidade	6	7,7
J Custo de Utilização	6	7,7
B Geometria	5	6,4
A Directo?	1	1,3
	78	100



A maior ou menor aptidão dos processos nas diversas características deve também ser ponderada de acordo com as respectivas capacidades [46]. Assim foi escolhida a seguinte escala:

- 0 (zero): O processo não possui desempenho relevante
- 1 (um): O processo possui um fraco desempenho
- 3 (três): O processo possui um desempenho médio
- 9 (nove): O processo possui um excelente desempenho

Os valores atribuídos por esta escala serão multiplicados pelos factores de ponderação associados à aplicação atribuídas aos processos e será a soma destes produtos que determinará a classificação do processo para a aplicação.

Conforme se pode constatar na Tabela 2.6, o valor 0 (zero) foi somente utilizado para classificar os processos indirectos o que, para o exemplo dado da selecção de um processo para o fabrico de um micro-componente, não é uma característica decisiva.



Tabela 2.6 – Pontuações obtidas pelos diversos processos

	Directo?	Geometria	Razão de Aspecto	Dimensão Mínima	Precisão	Rugosidade	Fonte de Energia	Acessibilidade do Processo	Tempo de Execução	Custo de Utilização	
Ponderação	1,3	6,4	17,9	9,0	12,8	7,7	12,8	12,8	11,5	7,7	Pontuação
Grav. Rad. Dir. Sincrotrão	0	3	3	3	3	3	1	1	3	3	245
Ablação Laser	0	9	1	3	3	3	3	3	9	9	414
Micro-estereolitografia	0	9	1	3	3	3	3	9	3	3	376
Foto-Polim. Bi-Fotónica	0	9	3	9	9	3	3	1	3	9	486
Micro-sinterização laser	1	9	1	3	3	3	3	9	3	3	377
LIGA Raio-X	1	3	9	9	9	9	1	1	9	1	585
LIGA-UV	1	3	1	3	3	3	3	3	1	9	285
LIGA-Feixe de lões	1	3	3	9	9	3	3	3	9	3	497
LIGA-Laser	1	3	1	3	3	3	3	3	3	3	262
<i>Laser Milling</i>	1	3	1	3	3	3	3	9	9	9	454
Gravação por Feixe lões	1	3	3	3	3	3	3	9	9	3	444
Micro-Fresagem	1	3	1	3	3	3	3	9	3	3	338
Micro-Torneamento	1	1	3	3	3	3	3	9	3	3	362
Micro-Furação	1	1	1	3	3	3	3	9	3	3	326
Micro-EDM	1	3	3	3	3	3	3	9	3	1	359
Micro-Furação EDM	1	1	3	3	3	3	3	9	3	3	362
Micro-WEDM	1	3	9	3	3	3	3	9	3	3	482
UPSAMS	1	9	3	3	3	3	3	1	3	3	310

Da Tabela 2.6 destaca-se com a pontuação mais elevada o processo LIGA Raio-X. Contudo, este processo de selecção não deverá ser entendido como exclusivo, ou seja, deverá permitir a seriação dos vários processos de modo a permitir tomar uma decisão fundamentada nas características dos processos mas também contextualizada com a realidade técnico-económica do potencial utilizador dos processos de micro-fabricação.



2.7.2. Custos Estimados dos Processos de Produção em Série

Dada a contribuição que os processos de produção em série de micro-componentes possuem para o sucesso das técnicas de micro-fabricação, é relevante quantificar alguns dos custos associados [47], tal como se indica na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Custos estimados para os processos de produção em série de microcomponentes, considerando a aquisição dos bens

Processo de Produção	Produto	Valor Estimado
Micro-Injecção	Cavidade	2.500 a 50.000€
	Estrutura de Molde	4.000 a 8.000€
	Máquina de Micro-Injecção	8.000 a 240.000€
Micro-Gravação a Quente	Matriz	2.500 a 40.000€
	Máquina de Micro-Gravação a Quente	80.000 a 240.000€

À semelhança do que acontece em termos convencionais, os produtos obtidos com base nestas técnicas de produção tendem a baixar o seu custo de produção à medida que aumenta a quantidade produzida.

Existem contudo, técnicas de micro-fabricação de fim de linha cujo custo depende directamente da área processada. Neste caso, dado que o custo de produção aumenta proporcionalmente à área, tratam-se de processos pouco apetecíveis para a produção em massa. São exemplo disso algumas técnicas utilizadas para o processamento de silício, no fabrico de microprocessadores.



2.8. A Micro-Fabricação no Mundo

Para se ter uma ideia concreta de quem utiliza a micro-fabricação, ter-se-á de lançar um olhar além fronteiras, uma vez que as empresas nacionais apenas recentemente encaram esta tecnologia como uma via a adoptar.

As tendências das micro e nano-tecnologias apontam as aplicações médicas como uma aplicação futura inquestionável assim como outras aplicações de elevado rigor técnico. Torna-se por isso relevante contextualizar a micro-fabricação dentro dos mercados dos quais as empresas podem depender, seja como fornecedores ou clientes.

É importante salientar que as micro-tecnologias existentes já produziram muitos dos micro-componentes com que se lida actualmente ao passo que as nano-tecnologias ainda se encontram em fase de investigação e desenvolvimento, produzindo para já, apenas protótipos para validação [48].

Estas tecnologias requerem uma multidisciplinaridade elevada dada a complexidade das suas aplicações. No domínio particular das nano-tecnologias, tal problema é ampliado pelos custos do equipamento necessário. Não são raras as parcerias entre os vários actores deste cenário para aproveitarem sinergias e ultrapassarem as dificuldades impostas.

De uma forma genérica, continuam a ser as instituições governamentais de cada país e os centros de investigação a fomentar a investigação nestas áreas junto das empresas. Na Tabela 2.8 é feita uma síntese nas três regiões económicas mais importantes, acerca dos actores e dos fundos atribuídos para o desenvolvimento destas tecnologias



Tabela 2.8 – A Micro-Fabricação na União Europeia, Estados Unidos da América e Japão, dados do Minatech Reports on Micro and Nano Tehcnologies, Dezembro de 2001.

	União Europeia	E.U.A.	Japão
Investigadores	Centros de Investigação Grupos Empresariais PMEs	PMEs Centros de Investigação Grupos Empresariais	Centros de Investigação Grupos Empresariais PMEs
Apoios governamentais a nano-tecnologias (1988-1998)	69.000.000€	> 1.300.000.000€	200.000.000€
Apoios governamentais a micro-tecnologias (1991-2001)	Financiamentos da UE e apoios nacionais	50.000.000€a 100.000.000€/ ano	28.000.000€/ ano
Foco da investigação	Investigação básica no desenvolvimento de produto	Investigação básica no desenvolvimento de produto	Forte investigação no desenvolvimento de produto

A combinação de micro e nano-tecnologias para o desenvolvimento de micro-sistemas para bio-aplicações terá um impacto fortíssimo no futuro destas tecnologias, uma vez que a necessária miniaturização e as cada vez mais sofisticadas funcionalidades exigidas terão uma tendência crescente. A Tabela 2.9 resume sucintamente algumas aplicações actuais e futuras, assim como as tecnologias que lhes deram origem.



Tabela 2.9 – Aplicações de Micro e Nanotecnologias actuais e futuras

Sector	Actual	Futuro	
Micro-tecnologias	Micro-electrónica	Pacemakers Implantes auditivos Sensores diversos Microscopia óptica Sensores de fibra óptica	Sentidos artificiais como a visão ou a audição
	Micro-óptica	Testes de DNA Endoscopia Cirurgia pouco invasiva Cirurgia Laser Micro-reactores	Ferramentas cirúrgicas multifuncionais e pouco invasivas
	Micro-fluidica	Micro-bombas Auxiliares cardiacos Sensores de caudal Micro-válvulas	Sistemas Lab-on-chip Sistemas de administração de medicação <i>in vivo</i> (ex.:diabetes) Sistemas inteligentes de bombeamento para aplicações de cardiologia Sensores de pressão sanguínea <i>in vivo</i>
	Micro-mecânica	Sensores de pressão sanguínea	Cateteres inteligentes (com sensores, válvulas, bombas, etc.) Auxiliares motores e músculos artificiais
Nano-tecnologias	Filmes Ultra-finos	Superfícies bio-compatíveis Sensores Engenharia de tecidos	Membranas bio-funcionais Dispositivos e órgãos bio-funcionais Sistemas de monitorização <i>in vivo</i> Sistemas Lab-on-chip
	Biomateriais e Estruturas biomoleculares	<Apenas investigação>	Tecnologia genética Órgãos artificiais Sistemas inteligentes de administração de medicação <i>in vivo</i> Tratamento médico não-invasivo Personalização da medicação
	Processamento Ultra-preciso de Superfícies	<Apenas investigação>	Sensores para cuidados intensivos Órgãos bio-artificiais
	Nano-sondas	Análise de superfícies biológicas	Monitorização genética Técnicas de manipulação molecular
	Nano-óptica	<Apenas investigação>	Retina artificial
	Nano-partículas	<Apenas investigação>	Nano-partículas para o tratamento do cancro Sistemas inteligentes de administração de medicação Marcadores funcionais
	Nano-máquinas	<Apenas investigação>	Nano-máquinas para ataque a células cancerígenas <i>in vivo</i> Cirurgia não-invasiva



2.9. Referências

- [1] Evans, B.; Mehalso, R.: How small is small?: A Guide to the New Microfabrication Design and Process Techniques; *Medical Device & Diagnostics Industry*, 11, 2001
- [2] Piötter, V.; Bauer, W.; Benzler, T.; Emde, A.; Injection molding of components for microsystems; *Microsystem Technologies* 7, 99-102, 2001
- [3] Bourdon, R.; Schneider, W.; A Systematic Approach to Microinjection Molding; Business Briefing; *Medical Device Manufacturing & Technology*, 2002
- [4] Grewell, D.; Mokhtarzadeh, A.; Benatar, A.; Lu, C.; Lee, L.; Feasibility Of Selected Methods for Embossing MicroFeatures in Thermoplastics; *ANTEC*, 1094-1098, 2003
- [5] Vasco, J.; André, N.; Bártoło, P.; Microfabrication: the state-of-the-art; *Proceedings of The 2nd International Conference on Advanced Research on Virtual and Rapid Prototyping*, 483-490, 2005
- [6] J. Hornes, J. Göttert, K. Lian, Y. Desta, L. Jian; Materials for LIGA and LIGA-based microsystems; *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 199, 332-341, 2003
- [7] Nasrullah, J.; Chemistry of photoresist materials and photolithographic processes – Recent developments; members.rediff.com/jaleelmn/slide001.htm; 30 de Maio de 2004
- [8] Cremers, C.; Bouamrane, F.; Singleton, L.; Schenk, R.; SU-8 as resist material for deep X-ray lithography; *Microsystem Technologies* 7, 11-16, 2001
- [9] Tabata, O.; Matsuzuka, N.; Yamaji, T.; You, H.; Fabrication of 3Dimensional Microstructures using Moving Mask Deep X-Ray Lithography (M²DXL); *The 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 94-97, 2001
- [10] Bischofberger, R.; Zimmerman, H.; Staufert, G.; Low-Cost HARMS Process; *Sensors and Actuators A61*, 392-399, 1997
- [11] Hsieh, G.; Hsieh, Y.; Yang, C.; Lee, Y.; Novel positive-tone thick photoresist for high aspect ratio microsystem technology; *Microsystem Technologies* 8, 326-329, 2002
- [12] Holmes, S.; Mitchell, P.; Hakey, M.; Manufacturing with DUV Lithography; *IBM Microelectronics Division*, 12, 1996
- [13] Munnik, F.; Benninger, F.; Mikhailov, S.; Bertsch, A.; Renaud, P.; Lorenz, H.; Gmür, M.; High aspect ratio, 3D structuring of photoresist materials by ion beam LIGA; *Microelectronic Engineering* 67-68, 96-103, 2003
- [14] R. A. Lawes, A. S. Holmes, F. N. Goodall; The formation of moulds for 3D microstructures using excimer laser ablation; *Microsystem Technologies* 3, 17-19, 1996
- [15] Pflöging, W.; Bernauer, W.; Hanemann, T.; Torge, M.; Rapid fabrication of microcomponents – UV Laser assisted prototyping, laser micromachining of mold inserts and replication via photomolding; *Microsystem Technologies* 9, 67-74, 2002
- [16] Bado, P.; Clark, W.; Said, A.; Introduction to Micromachining Handbook; [acedido a 7-2-2006 em www.cmxr.com/Industrial/Handbook/Introduction.htm](http://www.cmxr.com/Industrial/Handbook/Introduction.htm)
- [17] Lasertec Pfronten GmbH, Grupo Gildemeister AG; 3D-Removal and FineCutting via Laser – The LASERTEC Series; 2003; Publicação técnica



- [18] Reyntjens, S.; Puers, R.; A review of focused ion beam applications in microsystem technology; *Journal of Micromechanics and Microengineering* 11, 287-300, 2001
- [19] Chyr, I.; Steckl, A.; GaN focused ion beam micromachining with gas-assisted etching; *Journal of Vacuum Science Technology B* 19 (6), 2547-2550, 2001
- [20] Langford, R.; Dale, G.; Hopkins, P.; Ewen, P.; Petford-Long, A.; Focused ion beam micromachining of three-dimensional structures and three-dimensional reconstruction to assess their shape; *Journal of Micromechanics and Microengineering* 12, 111-114, 2002
- [21] Kruth, J. P.; Mercelis, I. P.; Van Vaerenbergh, J.; Froyen, L.; Rombouts, M.; Advances in Selective Laser Sintering; *Proceedings of The 1st International Conference on Advanced Research on Virtual and Rapid Prototyping*, 59-70, 2003
- [22] Petsch, T.; Regenfuss, P.; Ebert, R.; Hartwig, L.; Klötzer, S.; Brabant, Th.; Exner, H.; Industrial laser micro sintering; *Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and ElectroOptics 2004*; 2004
- [23] Regenfuss, P.; Hartwig, L.; Klötzer, S.; Ebert, R.; Brabant, Th.; Petsch, T.; Exner, H.; Industrial freeform generation of microtools by laser micro sintering; *Relatório Técnico do Laserinstitut Mittelsachsen e. V.*; 2003
- [24] Friedrich, C.; Vasile, M.; The micromilling process for high aspect ratio microstructures; *Microsystem Technologies* 2, 144-148, 1996
- [25] Lu, Z.; Yoneyama, T.; Micro cutting in the micro lathe turning system; *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39, 1171-1183, 1999
- [26] Hinds, B.; Treanor, G.; Analysis of stresses in micro-drills using the finite element method; *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40, 1443-1456, 2000
- [27] Yeo, S.; Yap, G.; A Feasibility Study on the Micro Electro-Discharge Machining Process for Photomask Fabrication; *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 18, 7-11, 2001
- [28] Malek, C.; Saile, V.; Applications of LIGA technology to precision manufacturing of high-aspect-ratio micro-components and -systems: a review; *Microelectronics Journal* 35, 131-143, 2004
- [29] Rooks, B.; The shrinking sizes in micro manufacturing; *Assembly Automation*, Volume 24, 4, 352-356, 2004
- [30] Murali, M.; Yeo, S.; Rapid biocompatible micro device fabrication by micro electrodischarge machining; *Biomedical Microdevices* 6:1, 41-45, 2004
- [31] Wang, A. C.; Yan, B. H.; Li, X. T.; Huang, F. Y.; Use of micro ultrasonic vibration lapping to enhance the precision of microholes drilled by micro electrodischarge machining; *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42, 915-923; 2003
- [32] Her, M.; Weng, F.; Micro-hole machining of copper using the electro-discharge machining process with a tungsten carbide electrode compared with a copper electrode; *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 17, 715-719, 2001
- [33] Benavides, G.; Bieg, L.; Saavedra, M.; Bryce, E.; High aspect ratio mesoscale parts enabled by wire micro-EDM; *Microsystem Technologies* 8, 395-401, 2002



- [34] Nishi, N.; Katoh, T.; Ueno, H.; Sugiyama, S.; Study on three-dimensional micromachining using synchrotron radiation etching; *Microsystem Technologies* 9, 1-4, 2002
- [35] Katoh, T.; Zhang, Y.; High aspect ratio micromachining by synchrotron radiation direct photo-etching; *Microsystem Technologies* 4, 135-138, 1998
- [36] Kim, J.; Kim, B.; Jeong, M.; Lee, M.; Fabrication of a micro-optical coupling structure by laser ablation; *Journal of Materials Processing Technology* 146, 163-166, 2004
- [37] Bertsch, A.; Lorenz, H.; Renaud, P.; 3D microfabrication by combining microstereolithography and thick resist UV lithography; *Sensors and Actuators* 73, 14-23, 1999
- [38] Bertsch, A.; Jiguet, S.; Bernhards, P.; Renaud, P.; Microstereolithography: a review; *Materials Research Society Symposium Proceedings* 758, LL1.1.1, 13, 2003
- [39] Lemerrier, G.; Mulaud, J.; Martineau, C.; Anémian, R.; Andraud, C.; Wang, I.; Stéphan, O.; Amari, N.; Baldeck, P.; Two-photon absorption: from optical power limiting to 3D microfabrication; *Comptes Rendues Chimie* 8, 1308-1316, 2005
- [40] Bártolo, P. J. S.; Optical approaches to macroscopic and microscopic engineering; Reading, Reino Unido, Universidade de Reading; 2001; Tese de Doutoramento
- [41] Houbertz, R.; Frölich, L.; Popall, M.; Streppel, U.; Dannberg, P.; Bräuer, A.; Serbin, J.; Chichkov, B.; Inorganic-Organic ybrid Polymers for Information Technology: from Planar Technology to 3D Nanostructures; *Advanced Engineering Materials* 8, 553-558, 2003
- [42] Kou, H.; Asif, A.; Shi, W.; Jiang, Z.; Huang, W.; A novel hyperbranched polyester acrylate used for microfabrications; *Polymers for Advanced Technologies* 15, 192-196, 2004
- [43] Stute, U.; Serbin, J.; Kulik, C.; Chichkov, B.; Three-dimensional nanostructure fabricated by two-photon polymerization of hybrid polymers; *Proceedings of the 1st International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, 399-403, 2003
- [44] Sharon, A.; Bilsing, A.; Lewis G.; Zhang, X.; Manufacturing of 3D microstructures using novel UPSAMS process for MEMS applications; *Material Research Society Symposium Proceedings* 741, J5.30, 151-156, 2003
- [45] Breyfogle III, F. W.; Implementing Six Sigma, Smarter Solutions[®] Using Statistical Methods, Second Edition, Capítulo 5, 111-140; John Wiley & Sons; 2003
- [46] Bañuelas, R.; Antony, J.; Case Study - Going from six sigma to design for six sigma: an exploratory study using analytic hierarchy process; *The TQM Magazine*, Volume 15, Number 5, 334-344, 2003
- [47] Ducrée, J.; Zengerle, R.; Microfabrication Technologies; Calgary, Canadá ; Universidade de Calgary ; 2004
- [48] Associazione Italiana per la Ricerca Industriale; Micro and Nano Technologies: A World Wide View; 3-39, Minatech Reports on Micro and Nano Technologies, 2001



3. Selecção do processo de Micro-Fabricação

3.1. Avaliação das necessidades

O trabalho inicial proposto para esta dissertação compreende a execução de cavidades para a injecção de micro-provetes para ensaios de tracção. Trata-se de uma peça de geometria simples e com uma razão de aspecto baixa (Figura 3.1).

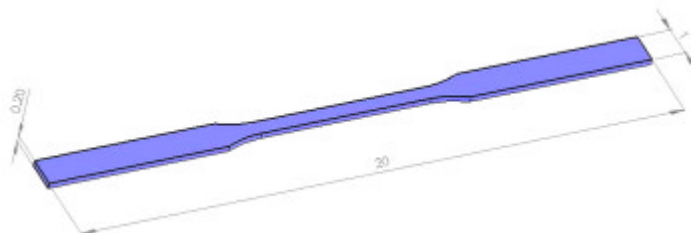


Figura 3.1 – Microprovete (dimensões em mm)

Após a análise da geometria do micro-provete, conclui-se que a razão de aspecto apenas se poderá aproximar por defeito do valor limite de 10:1.

Dado o objectivo de obter uma cavidade, logo uma ferramenta para o processo de micro-injecção, há todo o interesse em optar por um processo directo para minimizar etapas de produção.

Pela baixa razão de aspecto do micro-componente proposto, exclui-se a necessidade de adoptar qualquer um dos processos litográficos. No que respeita à razão de aspecto, o processo que consegue os valores mais baixos é o LIGA-UV e mesmo este consegue ainda atingir valores na ordem dos 20:1.

A opção por um processo directo exclui também os processos aditivos, uma vez que estes apenas poderiam produzir modelos, implicando fases posteriores de deposição de material para a obtenção duma cavidade adequada para o processo de micro-injecção.



A razão de aspecto 10:1 é um valor limite verificado para várias técnicas não-litográficas como a Micro-Fresagem ou o *Laser Milling*, tornando estas técnicas apetecíveis para estudo nesta dissertação e perfeitamente adequadas para dar resposta ao trabalho proposto.

3.2. Avaliação da disponibilidade

Limitando por necessidade a escolha do processo de micro-fabricação às soluções Micro-Fresagem e *Laser Milling*, há que avaliar também a disponibilidade destas técnicas.

Actualmente, a Micro-Fresagem ainda não é um processo muito implantado em Portugal, mesmo tendo em conta a forte tradição que o nosso país possui no fabrico de moldes para injecção de termoplásticos. Algumas empresas na zona da Marinha Grande realizam efectivamente alguns trabalhos interessantes neste domínio mas ainda não é uma técnica largamente implantada.

Verifica-se contudo, uma maior apetência pelo *Laser Milling* ainda que, por motivos económicos, muitas empresas estejam interessadas em adquirir esta tecnologia mas ainda não o tenham feito. Este tipo de equipamentos apresentam custos de aquisição entre 250.000€ e 500.000€ que, aliado ao ainda fraco conhecimento da tecnologia e das suas reais capacidades, actuais e futuras, desperta algum cepticismo quanto à sua aplicabilidade no sector da indústria de moldes. Após uma breve avaliação do mercado nacional, é fácil constatar quantos equipamentos de *Laser Milling* existem e aferir da sua disponibilidade para a realização do trabalho proposto (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Equipamentos de *Laser Milling* existentes em Portugal (2005)

Empresa / Instituição	Equipamento	Fabricante	Potência Laser	Ano Aquisição
HASCO Portuguesa	G900	Foba GmbH	100W	2002
INETI	DML 40 SI	Gildemeister AG	100W	2004
Famolde, S.A.	Lasertec 40	Gildemeister AG	100W	2005



Após consulta e atendendo não só à disponibilidade demonstrada como também a razões de ordem logística, a eleição do parceiro para a execução dos trabalhos propostos recaiu sobre a HASCO Portuguesa, sediada na Marinha Grande. Esta empresa adquiriu o equipamento com o intuito de realizar gravações de pequena profundidade, essencialmente orientadas para a indústria de moldes local, como substituto directo do processo de Electroerosão por penetração. Contudo, o equipamento possui capacidades que não são exploradas neste tipo de utilização, sendo também este um dos motivos para a parceria estabelecida durante este trabalho de investigação.



3.3. Laser Milling: Caracterização do processo

O processo *Laser Milling* aplicado a uma gama muito diversa de materiais tem vindo a mostrar nos últimos anos uma aptidão importante dentro dos processos de micro-fabricação. Esta aptidão é fruto do compromisso entre comprimento de onda, tempo de impulso, resolução, potência útil, taxa de remoção de material e custo de posse da tecnologia.

3.3.1. Princípio da Remoção de Material por Laser

Os mecanismos de interacção do feixe laser com o material em processamento estão ilustrados na Figura 3.3. A energia do laser é focada na superfície do material sendo absorvida parcialmente. Esta capacidade de absorção por parte do material depende não apenas do material em si mas também do seu acabamento superficial, da densidade de potência aplicada e do comprimento de onda do laser.

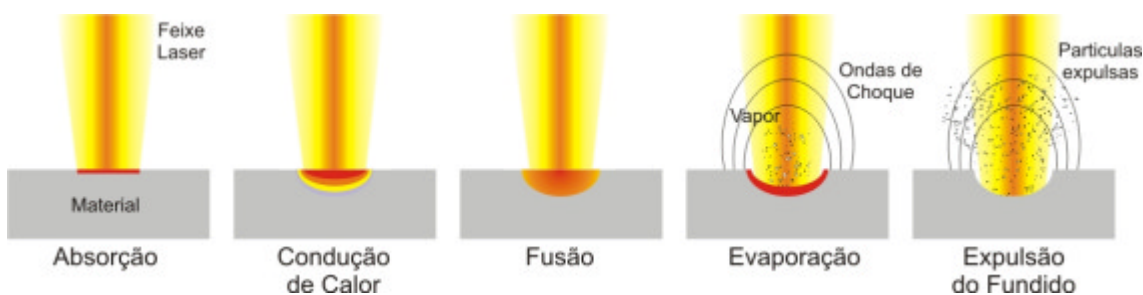


Figura 3.2 – Interação do feixe laser com o material

Utilizando lasers CO_2 , a absorção de energia é muito baixa, cerca de 20% para um comprimento de onda de 10600nm. Com lasers de excímeros ou Nd:YAG, a absorção de energia já atinge valores que podem chegar aos 80%.

A restante energia é reflectida. A absorção ocorre apenas numa camada muito fina do material onde a energia óptica do laser é convertida em calor.



A energia absorvida difunde-se pelo material por condução e funde-o. Tomando como exemplo o aço, este pode atingir o ponto de fusão ao fim de 300ns com uma densidade de potência absorvida de 10^9 W/cm².

Com tempos de fusão desta ordem de grandeza, verificam-se elevadas taxas de vaporização, podendo os vapores atingir velocidades até 10km/s, provocando uma onda de choque e aumentando consideravelmente a pressão sobre o material liquefeito, incrementando ainda mais a sua temperatura.

Finalmente, o material liquefeito é expulso como resultado da elevada pressão e temperatura no final do impulso laser [1].

3.3.2. Principais vantagens e desvantagens do processo *Laser Milling*

As principais vantagens enumeradas pelos fabricantes são as seguintes [2]:

- Os equipamentos dispõem de feixes laser de diâmetro máximo 100µm (opcionalmente podem ser propostos diâmetros de 40 ou 50µm),
- O feixe laser processa vários materiais independentemente da sua dureza, sejam estes cerâmicos ou metálicos,
- Existe um feixe laser e não uma ferramenta física, logo, a ferramenta não parte durante o processamento nem se desgasta,
- Os equipamentos dispõem de software próprio que lhes permite gerar o programa de maquinação directamente a partir do ficheiro CAD.
- Esta técnica torna a electroerosão convencional por penetração praticamente obsoleta uma vez que diminui drasticamente a necessidade de fabricar os eléctrodos necessários, diminuindo os custos e os tempos de fabrico inerentes.

De uma forma geral, esta é a oferta típica neste tipo de equipamentos na sua versão base. Existem outras capacidades disponíveis sob opção, obviamente, com diferentes custos de aquisição como sejam, por exemplo, a garantia da verticalidade das paredes laterais de uma cavidade ou o controlo e reajuste da profundidade de processamento.



Ainda assim, este é um grupo de vantagens deveras importante atendendo a um mercado cada vez mais competitivo e exigente. É previsível um aumento rápido deste tipo de equipamentos no mercado nacional, quer na indústria de moldes como na de metalomecânica de elevada precisão, onde este tipo de equipamento pode incorporar mais-valias significativas.

As principais limitações apresentadas pelo processo *Laser Milling* nos equipamentos actualmente comercializados são:

- A razão de aspecto apresentada pelas micro-estruturas realizadas pelo processo é igual ou inferior a 10:1, algo que será melhorado futuramente pelas evoluções dos lasers ao nível do bombeamento e da geometria dos seus elementos ópticos.
- As taxas de remoção de material são bastante reduzidas face a outros processos convencionais de remoção de material, tornando o processo pouco viável quando o volume a remover for considerável.
- A garantia da verticalidade das paredes laterais exige módulos adicionais ao equipamento (para os equipamentos que dispõem desta opção), tornando-o mais dispendioso.
- A estratégia de remoção de material por camadas coloca problemas adicionais em zonas pré-maquinadas, o laser não é uma ferramenta física, portanto, o seu feixe só será absorvido e reflectido quando encontrar material.



3.3.3. Equipamentos

Os equipamentos de *Laser Milling*, (Figuras 3.3 e 3.4), dada a sua natureza de elevada precisão, possuem características construtivas importantes, necessárias para garantir um bom desempenho [2]:

- Estrutura monobloco,
- Laser já devidamente integrado no equipamento,
- Guiamentos auto-lubrificados,
- Guiamentos lineares e por esferas recirculantes e
- Servomotores digitais para movimentos de precisão.



Figura 3.3 – DMG DML40SI [2]



Figura 3.4 – Foba G900 [3]

3.3.4. Operação do Equipamento

A técnica de *Laser Milling* é baseada numa estratégia de processamento por camadas. O ficheiro CAD com o volume a remover é convertido para o formato STL e daí, introduzido directamente no programa de maquinação por laser. O modelo STL (Figura 3.5) deverá ser posicionado sobre a superfície, podendo, caso isso seja necessário, aplicar-se algum factor de escala.



O programa realiza o *slicing* automático do volume de acordo com os parâmetros definidos pelo operador e também em função do material a processar. As camadas possuem tipicamente espessuras entre 1 a 5 μ m.

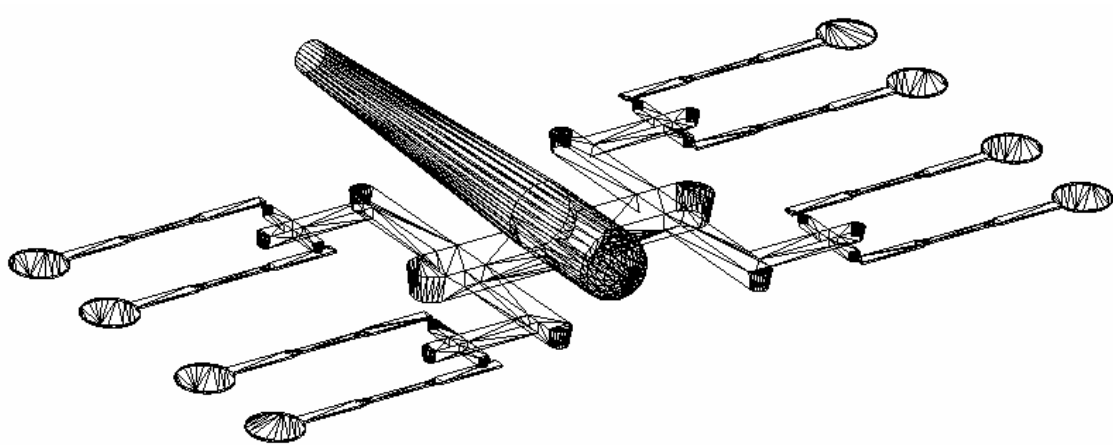


Figura 3.5 – Microprovetes em STL

Para além da espessura de camada, o material a processar condiciona também os parâmetros operatórios do laser. Estes devem ser escolhidos de acordo com o material e a sua reflectividade assim como em função do tipo de operação a realizar. O estado superficial da peça pode também influenciar estes parâmetros uma vez que diferentes acabamentos superficiais possuem reflectividades igualmente diferentes. Os valores limite utilizados para este trabalho de investigação são os indicados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Parâmetros operatórios do laser para a Foba G900

Parâmetro	Valores	Unidades
Corrente de Lâmpada [L_s]	30 (máximo)	A
Frequência de Impulso [F_q]	65 (máximo)	KHz
Velocidade de Varrimento [V_g]	500 (máximo)	mm/s
Q-Switch	0,5; 0,8; 1; 1,2; 2,5; 5	mm

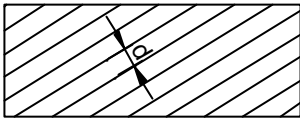

A opção por valores de frequência elevados é benéfica uma vez que a diminuição do tempo de impulso e o subsequente aumento da densidade de potência aplicada incrementam substancialmente a qualidade do processamento. As áreas termicamente afectadas diminuem, a



camada superficial endurecida torna-se mais fina, diminui a ocorrência de micro-fissuras e aumenta a estabilidade geométrica.

A escolha da estratégia de varrimento a adoptar para o feixe laser é outro factor que pode condicionar a eficiência do processo. O programa de maquinação por laser permite a selecção de estratégias CNC comuns ou de padrões de varrimento lineares. Os padrões de varrimento lineares são uma escolha comum neste processo dada a sua rapidez de execução, daí que o estudo dos parâmetros associados aos padrões de varrimento seja também relevante (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Parâmetros dos padrões de varrimento em *Laser Milling*

Parâmetro	Unidades	
Distância entre varrimentos [d]	mm	
Ângulo dos varrimentos [β]	Graus	

Após a definição dos parâmetros, é feito o *setup* do equipamento. Pelo facto de não existirem forças de corte em jogo neste processo, o *setup* fica simplificado se for utilizada uma mesa magnética, caso o material assim o permita. Para materiais não-ferrosos, ter-se-á que recorrer a modos de fixação por aperto, apenas para garantir o posicionamento da peça durante movimentos da mesa.

Após a fixação da peça na mesa, há que definir o zero para o início do processamento, o que é feito com o auxílio de uma micro-câmara directamente a partir do programa de maquinação por laser.



Realizada a afinação nos eixos X e Y, há que ajustar a distância focal de forma a garantir a dimensão do ponto laser sobre a peça, o que é realizado com o auxílio de um marcador laser (Figura 3.6).

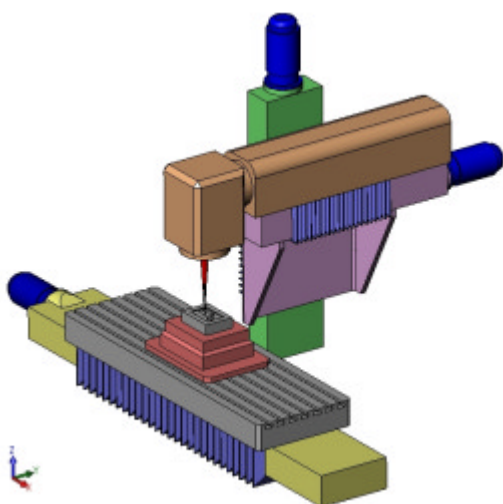


Figura 3.6 – Diagrama esquemático dos 3 eixos lineares de movimento da Foba G900

Dependendo do fabricante e do tamanho disponível da mesa do equipamento, à semelhança do que sucede nos comandos CNC, os programas de maquinação por laser podem admitir múltiplos *setups*. Neste caso, podem ser colocadas várias peças sobre a mesa e fixadas, criado um ficheiro de comandos para assegurar os movimentos intermédios entre peças, o que possibilita a operação segura do equipamento sem a presença do seu operador.

Esta mesma estratégia é aplicada para várias maquinações laser sobre a mesma peça, desde que haja o cuidado prévio de ajustar a profundidade para cada zona, uma vez que a distância focal pode sofrer alterações.

Concluído este procedimento, para uma ou várias peças, o processo pode ser iniciado. Logo após o início do processo o programa fornece uma estimativa bastante realista para o tempo previsto de processamento.



3.3.5. Verticalidade das paredes laterais

Um dos problemas detectados na fase inicial da aplicação desta técnica e que condicionou fortemente a obtenção de micro-estruturas com razões de dimensões mais elevadas foi a capacidade de assegurar a verticalidade das paredes laterais de uma cavidade.

Equipamentos como os mencionados no ponto 2.3.2, possuem áreas de trabalho máximas de 110x110mm, o que para distâncias focais que podem chegar até aos 160mm, podem significar a obtenção de paredes laterais com um máximo de 15° de inclinação, quando estas deveriam ser verticais. Esta situação deve-se ao facto da mesa permanecer estacionária e de ser o conjunto de espelhos galvanométricos a executar o varrimento do feixe laser sobre a área de trabalho, o que faz com que a distância focal aumente nessas situações limite e a densidade de potência aplicada sofra uma diminuição [2].

Tal como já foi mencionado, este problema será tanto mais grave quanto maior for a profundidade da micro-estrutura a obter. Para além disso, para uma mesma maquinação laser, este problema far-se-á sentir mais quanto maior for a área de trabalho utilizada pela micro-estrutura a obter.

Para obviar a este problema, alguns fabricantes como a Gildemeister, incorporou nos seus modelos DML 40SI e DMU 60L a funcionalidade de deslocar a mesa e alterar o ângulo de incidência do feixe laser para garantir a verticalidade das paredes laterais.

Contudo, esta função (Figura 3.7) só é activada quando a área de trabalho é superior a 60x60mm, possuindo o equipamento rotinas de verificação de profundidade e do ângulo de incidência do feixe laser para correcção da distância focal e dessa forma, manter o valor da densidade de potência aplicada para áreas de menor dimensão [2].



Figura 3.7 – Sequência de movimentos de mesa e de reajuste do feixe laser para a maquinação de paredes verticais [2]

Dentro dos equipamentos aqui mencionados, esta funcionalidade não existe incorporada na Foba G900 (sistema utilizado neste trabalho de investigação) nem no modelo base da Gildemeister, a DML 40. Dada a baixa razão de aspecto das micro-estruturas a criar através do sistema Foba G900, tal não constituiu uma limitação



3.4. *Laser Milling* versus Electroerosão por Penetração

A eliminação da electroerosão convencional por penetração é tida como a principal vantagem do processo de *Laser Milling*, com consequentes ganhos nos tempos e custos inerentes ao fabrico de eléctrodos. Analisando a cadeia de produção relativa a cada um dos processos, torna-se evidente a razão de ser de tal afirmação (Figura 3.8).

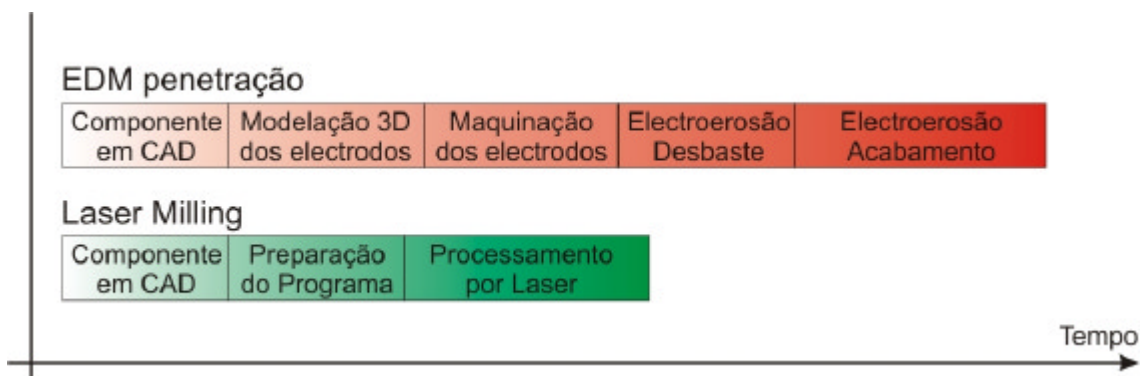


Figura 3.8 – Comparação dos processos *Laser Milling* e Electroerosão por penetração

O processo de electroerosão por penetração manter-se-á enquanto possuir características que o tornem competitivo face a outras tecnologias. A capacidade de realizar grandes desbastes com eléctrodos de grande dimensão e complexidade e a erosão planetária com eléctrodos de geometria negativa são capacidades ainda interessantes no contexto da metalomecânica de precisão e da indústria de moldes.

Actualmente, o *Laser Milling* apenas detém rentabilidade económica na execução de pequenas cavidades, independentemente da sua complexidade. As taxas de remoção de material são relativamente baixas quando comparada com outras técnicas convencionais, ainda que com capacidades bem diferentes.

No caso de volumes significativos de material a remover, será útil enquadrar na cadeia de produção algum sub-processo capaz de fazer o desbaste e de aproximar a cavidade da geometria final o suficiente para que o *Laser Milling* possa ser eficaz [4].



Alguns fabricantes propõem centros de maquinação com capacidades combinadas, isto é, um centro de maquinação de alta velocidade mas em que o porta-ferramentas possui acoplado um laser para a maquinação de precisão (Figuras 3.9 e 3.10).

Desta forma, estes equipamentos podem funcionar de modo análogo a outros com a capacidade acrescida de poderem realizar geometrias de dimensões reduzidas, utilizando o mesmo *setup* e mantendo o mesmo zero, dispensando uma etapa posterior no processo produtivo.



Figura 3.9 – DMU 60L [2]



Figura 3.10 – Pormenor do porta-ferramentas da DMU 60L [2]



3.5. Evoluções futuras

O processo *Laser Milling* possui alguns problemas que derivam directamente do facto de depender de todos os mecanismos de interacção com o material descritos anteriormente em 2.3.1. São exemplo disso as áreas termicamente afectadas, as micro-fissuras e a alteração das propriedades da superfície do material processado.

Problemas como estes podem ser ultrapassados com a utilização de lasers com tempo de impulso na ordem dos femtosegundos e picosegundos ou de maiores potências aplicadas.

3.5.1. Densidade de Potência

Os lasers Nd:YAG que actualmente equipam os equipamentos de *Laser Milling* são bombeados actualmente por lâmpadas de flash (Anexo A1), normalmente designados por FPSSL (*Flash-lamp Pumped Solid State Laser*). O aparecimento dos lasers Nd:YAG bombeados por diodos – DPSSL (*Diode Pumped Solid State Laser*) a operar também no comprimento de onda de 1064nm terá seguramente um forte impacto nesta tecnologia. Estes lasers oferecem potências superiores a 200W em frequências de operação na ordem dos 50KHz, conseguindo valores de densidade de potência bastante superiores aos oferecidos pelos Nd:YAG FPSSL [5].

3.5.2. Comprimento de Onda

A realização de testes de maquinação com lasers a operar em comprimentos de onda dentro do espectro visível ou na proximidade do infra-vermelho tem provado a sua mais valia para o processo *Laser Milling*. Todavia, a potência disponível é menor em comprimentos de onda curtos, pelo que estes lasers terão de operar com frequências elevadas para obter densidades de potência úteis para processamento [6].



A optimização do comprimento de onda de um laser Nd:YAG FPSSL pode ser realizada com a introdução de cristais ópticos não-lineares como o KD_2PO_4 ou o KTiOPO_4 (Figura 3.12). A conversão da sua frequência fundamental nas suas 2ª ($\lambda=532\text{nm}$), 3ª ($\lambda=355\text{nm}$) e 4ª ($\lambda=266\text{nm}$) harmónicas permite a adaptação do laser à reflectividade do material [6] (Figura 3.11).

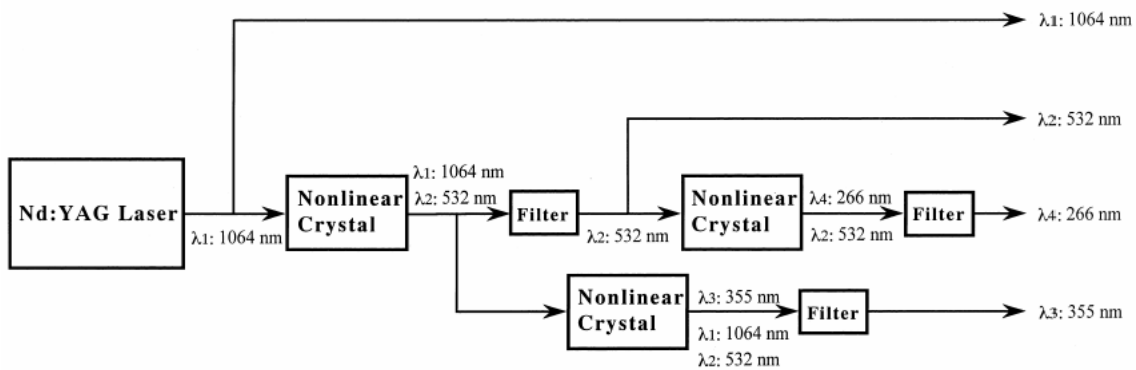


Figura 3.11 – Obtenção da 2ª, 3ª e 4ª frequências harmónicas obtidas a partir de um laser Nd:YAG através da utilização de cristais ópticos não-lineares [6]

Esta adaptação não é isenta, porém, de perdas na conversão de frequência, verificando-se perdas que terão de ser compensadas por um aumento de potência.

Existem lasers utilizados no processamento de metais a operar desde o comprimento ultravioleta até ao infravermelho, pelo que a utilização de outros tipos de lasers como os Titânio:Safira ou os lasers de excímeros (XeCl, KrF, entre outros) pode também ser uma possibilidade, muito embora demonstrem ainda pouca eficiência para esta aplicação [7].

3.5.3. Processos inovadores

Tipicamente, o processo *Laser Milling* é, como o próprio nome indica, análogo a um processo de fresagem e como num centro de maquinação, apenas opera uma ferramenta em simultâneo.

Como alternativa a esta estratégia de fabricação, têm sido desenvolvidos processos utilizando técnicas multi-feixe laser com o objectivo de aumentar o desempenho em algumas situações específicas [8] (Figura 3.12).

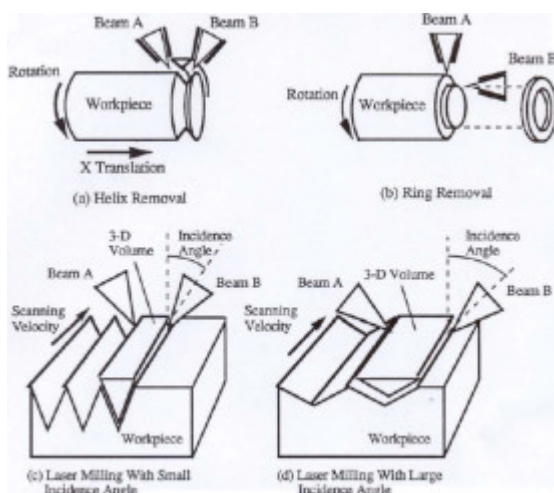


Figura 3.12 – Processos multi-feixe laser [8]

O aproveitamento de dois feixes laser que se intersectam permite a remoção de material sem que seja o laser responsável pela sublimação de todo o volume de metal removido.

Estas técnicas serão aplicadas a processos algo equivalentes ao torneamento (Figura 3.12 (a) e (b)) e na fresagem de rasgos (Figura 3.12 (c) e (d)).

Ambos os processos apresentam fortes limitações no que se refere às geometrias que podem realizar. Em ambas as situações, há dependência da intersecção dos feixes para garantir a remoção de material não sendo portanto possível, por exemplo, realizar um rasgo com um fundo plano. Todavia, existe potencial industrial para estas técnicas dada a capacidade de remoção de material que apresentam.

Uma outra estratégia desenvolvida por Chrysoulouris [9] prevê a utilização de dois feixes laser, guiados no interior de dois braços móveis que suportam as respectivas cabeças (Figura 3.13). A peça a processar está montada numa bucha rotativa com vários graus de liberdade para além da rotação, o que aliado aos graus de liberdade das cabeças laser, permite a execução de peças 3D complexas. Tal como a técnica anterior, esta é por certo, mais adequada se aplicada para soluções industriais específicas.

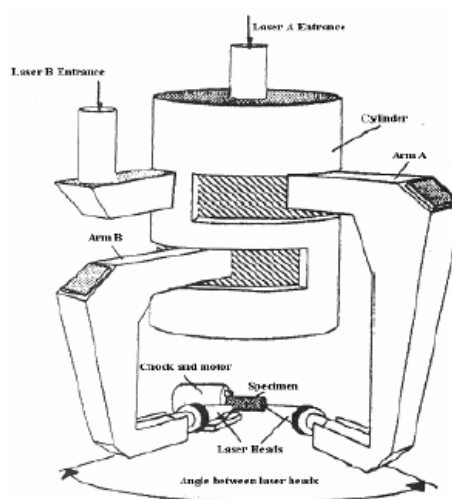


Figura 3.13 – Processos multi-feixe laser 3D [9]



3.6. Conclusões

Este capítulo descreve em detalhe o processo *Laser Milling*. Trata-se de um processo de micro-fabricação que apresenta como principais vantagens a capacidade de realizar micro-estruturas com elevada precisão directamente, a partir de um modelo CAD 3D. Esta tecnologia é particularmente interessante para a produção de micro-componentes de razão de aspecto até 10:1, sendo por isso relevante para algumas aplicações destinadas à micro-injecção.

No capítulo seguinte apresentar-se-á o projecto do molde que servirá de base à avaliação da aplicabilidade desta tecnologia à micro-injecção.



3.7. Referências

- [1] Meijer, J.; Laser micromachining; Marcel Dekker Inc., Edition, 203-324, Capítulo 8, 2001
- [2] Lasertec Pfronten GmbH, Grupo Gildemeister AG; 3D-Removal and FineCutting via Laser – The LASERTEC Séries; 2003; Publicação Técnica
- [3] FOBA GmbH, Grupo Virtek; Laser systems for marking and engraving; 2001; Publicação Técnica
- [4] Osório, A.; Silva, A.; Moldes Rápidos para Injecção – Tecnologia de Erosão por Laser 3D; Fabrico Rápido de Ferramentas; 36-51; 2004
- [5] Harrison, P.; Henry, M.; Henderson, I.; Brownell, M.; Laser Milling of Metallic and Non-Metallic Substrates in the Nanosecond Regime with QSwitched Diode Pumped Solid State Lasers; *Proceedings of High Power Laser Ablation 2004*, 2004
- [6] He, L.; Namba, Y.; Narita, Y.; Wavelength optimisation for machining metals with the harmonic generations of a short pulsed Nd:YAG laser; *Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology* 24, 245-250, 2000
- [7] Henry, M.; Harrison, P.; Henderson, I.; Brownell, M.; Laser Milling – A Practical Industrial Solution for Machining a Wide Variety of Materials; *Proceedings of The 5th Symposium on Laser Precision Manufacturing – Science and Applications*, 2004
- [8] Tsoukantas, G.; Salonitis, K.; Stavropoulos, P.; Chryssoulouris, G.; An Overview of 3D Laser Materials Processing; *Proceedings of the 3rd International Conference on Laser Technologies and Applications*, 224-228, 2002
- [9] Chryssoulouris, G.; Sheng, P.; Anastasia, N.; Development of Techniques for Three-Dimensional Laser Machining; *Journal of Materials and Manufacturing* 5, 916-924, 1991



4. Molde para trabalho experimental

De modo a avaliar experimentalmente a tecnologia de *Laser Milling* descrita no Capítulo 3, foi projectado, fabricado e testado um molde destinado à obtenção de provetes para ensaios à tracção.

O molde apresenta algumas especificidades resultantes do seu carácter experimental, demonstrando também a aplicabilidade industrial destes processos, através do tipo de materiais utilizados que são de uso comum na indústria de moldes.

O molde incorpora instrumentação que permite monitorizar a pressão e a temperatura na superfície das cavidades durante o ciclo de processamento.

A necessidade de prover o molde de meios de aquecimento assim como da instrumentação adequada para realizar a leitura das condições de processamento, obrigou a prever zonas de entrada e saída de cablagem no molde, tanto para a potência como para o controlo.

Neste Capítulo apresenta-se uma descrição detalhada do projecto do molde.

4.1. Componente a produzir

O componente a produzir é um micro-provete de ensaios de tracção (Figura 4.1). A geometria deste provete foi obtida através de uma redução à escala de 1:20 relativamente ao provete definido pela Norma ISO-527. As suas extremidades foram alongadas para permitir uma melhor fixação aquando da realização dos ensaios de tracção mas foram preservadas as relações entre dimensões na zona de ensaio do provete.

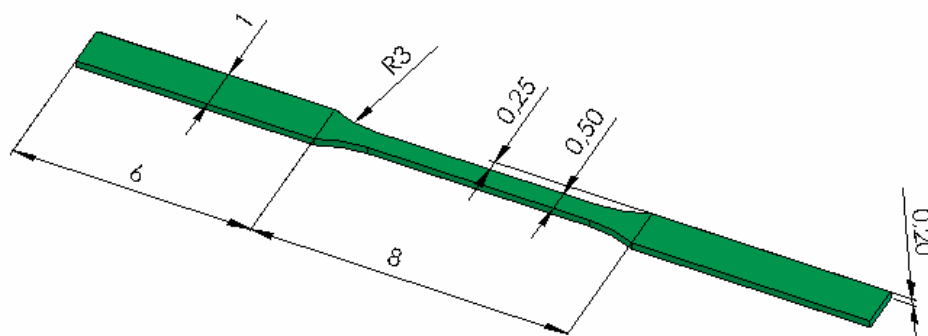


Figura 4.1 – Dimensões do microprovetete

Trata-se de um componente com uma razão de aspecto bastante baixa. A menor largura que o componente possui é a da zona de ensaio (0,5mm) e a sua espessura é de apenas 0,2mm, traduzindo-se numa razão de aspecto de 0,1.

4.2. Equipamento

Antes de avançar para o projecto do molde, foi necessário atender aos condicionalismos impostos pelo equipamento que foi utilizado, nomeadamente a instrumentação da Kistler, as sondas 6190A e o respectivo sistema de aquisição de dados assim como o equipamento de injeção utilizado, a unidade de co-injecção EL27 e a unidade de injeção D80.

4.2.1. Instrumentação

A utilização de instrumentação no molde passou pela incorporação de duas sondas piezoeléctricas (Kistler 6190A) em duas das suas impressões. Estas sondas estão montadas directamente na superfície da impressão de modo a que a sua face, através da qual se realiza a medição da pressão e temperatura local do material injectado, esteja em contacto com o fundido.

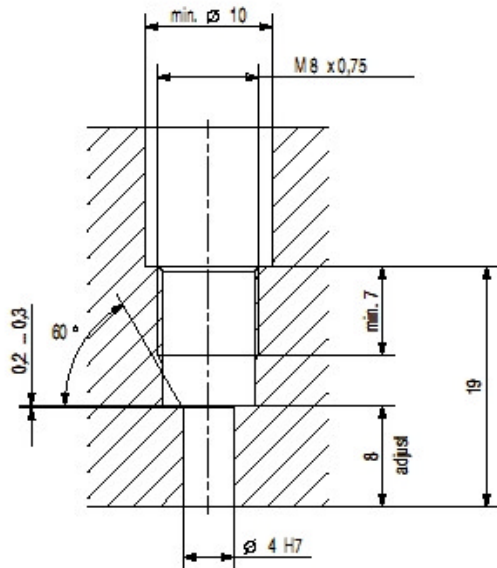


Figura 4.2 – Pormenor de montagem da sonda Kistler 6190A [1]

Neste tipo de sonda, a pressão actua sobre toda a sua superfície frontal e é transmitida a um elemento de medição em quartzo, que produz uma carga eléctrica, sendo esta carga posteriormente transformada numa tensão entre 0 a 10V.

A temperatura do polímero é medida por dois termopares tipo K, também colocados na superfície frontal da sonda.

A superfície frontal destas sondas não pode ser maquinada, daí que a sua localização privilegiada seja em faces planas da peça.

As sondas possuem um diâmetro de 4mm na zona de contacto (Figura 4.2), o que obrigou a uma alteração no micro-provete para garantir uma superfície de medição adequada para estas sondas. Para esse efeito, foi criada na extremidade do micro-provete, uma zona com um diâmetro de 5mm que permitisse o contacto adequado com a sonda (Figura 4.3).

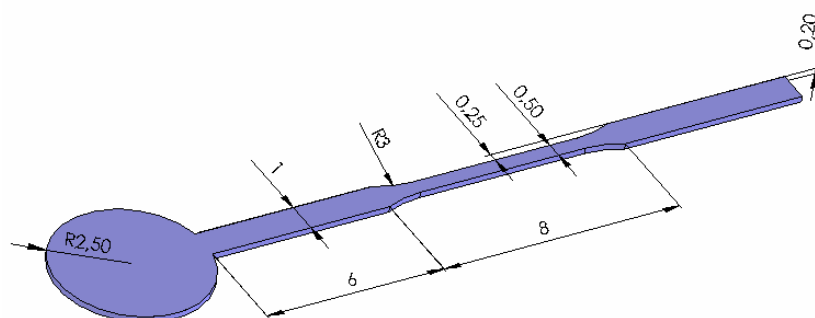


Figura 4.3 – Microprovete modificado.



Figura 4.4 – Sonda Kistler 6190A

A sonda Kistler 6190A (Figura 4.4) opera até uma pressão máxima de 2000bar e com uma temperatura máxima de 450°C no fundido. Contudo, opera apenas em condições normais até à temperatura de 200°C, o que obrigou a alguns cuidados no projecto do molde.

4.2.2. Equipamento de Injecção

Dada a indisponibilidade de equipamento adequado à micro-injecção, houve necessidade de adoptar equipamento alternativo, capaz de operar nas mesmas condições. Os requisitos colocados a um equipamento alternativo de injecção prendem-se essencialmente com a capacidade de injecção, que deve ser tão baixa quanto possível para esta aplicação.

A avaliação do volume e do peso feita ao micro-provete permitiu concluir que para atingir um volume mínimo aceitável para a utilização de um equipamento de injecção alternativo, ter-se-ia de criar várias cavidades alimentadas por um canal de alimentação, tendo este que ser relativamente volumoso quando comparado com as cavidades que alimenta.

A unidade de injecção utilizada foi uma unidade de co-injecção eléctrica, modelo Plasdan EL27 (Figura 4.5) com uma capacidade máxima de injecção de 10,8g e que corresponde às necessidades do processo de produção pretendido. Esta unidade de injecção foi montada sobre a unidade de injecção D80 existente no Laboratório de Tecnologia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria (ver Secção 4.5), tendo esta a única função de realizar o fecho do molde.



Figura 4.5 – Conjunto Unidade de Controlo e Unidade de CoInjecção Eléctrica Plasdan EL27

Todavia, o facto de o equipamento Plasdan EL27 ser vocacionado para a co-injecção implicou algumas adaptações, nomeadamente na disposição dos canais de alimentação uma vez que a alimentação do molde passou assim a ser feita pelo plano de junta.

A unidade de co-injecção utilizada é uma unidade vertical, com um fuso de 16mm de diâmetro e uma relação L/D de 22,5.

Esta unidade terá, como se mencionou anteriormente, que ser adaptada a uma máquina de injecção. Esta funcionará somente como prensa uma vez que não compete à unidade de co-injecção garantir o fecho do molde.

Seleccionado o equipamento de injecção, foi então projectada a moldação (Figura 4.6) tendo em conta a capacidade mínima de injecção da unidade Plasdan EL27 que é, segundo o seu fabricante, entre 1 a 3cm³.

A necessidade de atingir volume desta grandeza para o total da moldação vai fazer com que a eficiência do material desça imenso, dado que o volume de um provete é cerca de 0,008cm³.

Na tabela 4.1, é feita uma análise da eficiência de utilização do material, onde se constata que as peças finais são menos de 5% do total da moldação.

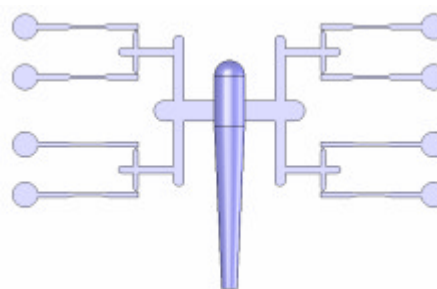





Figura 4.6 – Moldação preparada para injecção dos 8 provetes no plano de junta do molde



Tabela 4.1 – Avaliação da eficiência do material utilizado na moldação, em termos de peso e de volume. Foi considerada uma densidade média de 1,2g/cm³ para o polímero (PP) a injectar.

Moldação	Volume	Peso	%	Geometria
1 Provete	0,007198 cm ³	0,008639 g	0,52	
8 Provetes	0,057584 cm ³	0,069112 g	4,15	
Canais	1,331506 cm ³	1,597807 g	95,85	
Moldação completa	1,389096 cm ³	1,666915 g	100	

4.3. Projecto do Molde

Um projecto de molde obedece normalmente a um conjunto de requisitos, requisitos esses que podem ser impostos pelo equipamento de injeção, pela geometria das peças a injectar, pelo número de moldações pretendido, entre outros [2].

Normalmente, o conjunto de sistemas funcionais típico de um molde costuma dar resposta a estes requisitos. Não se tratando neste caso de um molde típico, continua a obedecer a alguns requisitos, muito embora neste caso concreto, alguns possam ser contornados.

A descrição do projecto do molde é feita em seguida, analisando-se cada um dos sistemas funcionais utilizados e realçando-se as diferenças existentes entre o projecto deste molde experimental e o projecto de um molde típico.



4.3.1. Alimentação

A alimentação do molde, uma vez que a injecção é feita no plano de junta, é feita a partir de uma das paredes laterais da cavidade. Para isso, o molde teve de ser preparado para que o bico da unidade Plasdan EL27 pudesse penetrar na estrutura e fazer o encosto directamente nas cavidades.

O canal principal é circular derivando posteriormente para dois canais secundários de secção trapezoidal. A partir daí, todos os restantes canais mantêm a secção trapezoidal até chegar ao ataque. A opção pela secção trapezoidal possibilita que todos os canais que a utilizam, sejam apenas maquinados numa das cavidades. Os canais de alimentação foram projectados de forma a serem tão curtos quanto possível para minimizar as perdas térmicas, que são elevadas devido à sua baixa massa.

A distribuição foi feita de forma a garantir o balanceamento natural de todas as cavidades, todos os percursos são iguais assim como as secções dos canais (Figuras 4.7 e 4.8).

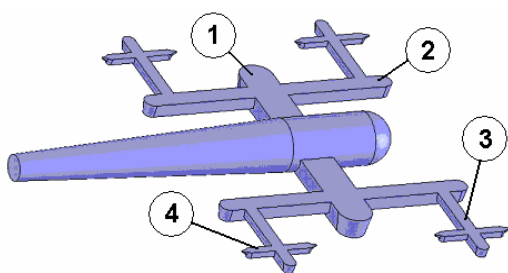


Figura 4.7 – Modelo 3D dos canais de alimentação

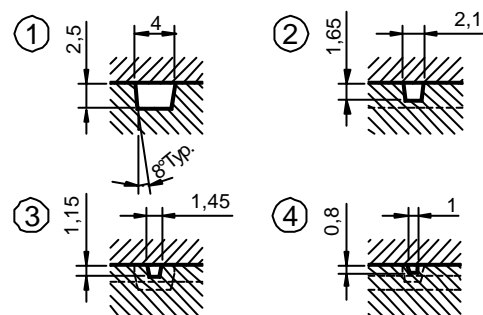


Figura 4.8 – Secções dos canais de alimentação

Em acréscimo, foi realizada uma análise simples de enchimento no *software* Moldflow Plastics Insight com o intuito de verificar não apenas o enchimento como também as condições de pressão e temperatura do fundido, a existência e localização de prisões de ar (ver Figuras 4.9 a 4.14).

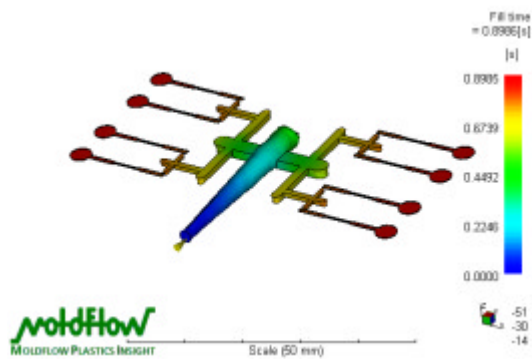


Figura 4.9 – Tempo de enchimento

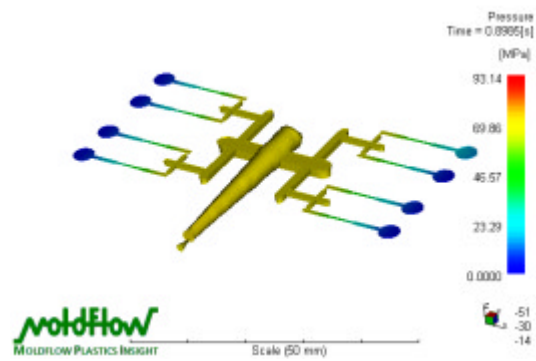


Figura 4.10 – Pressão no enchimento

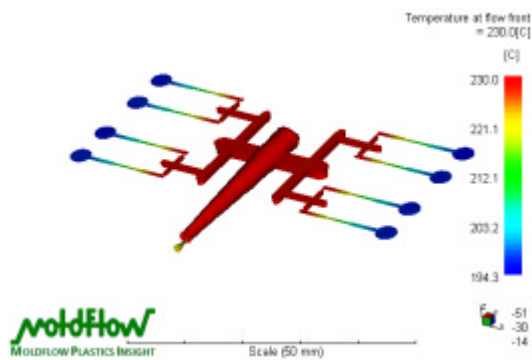


Figura 4.11 – Temperatura na frente do fundido

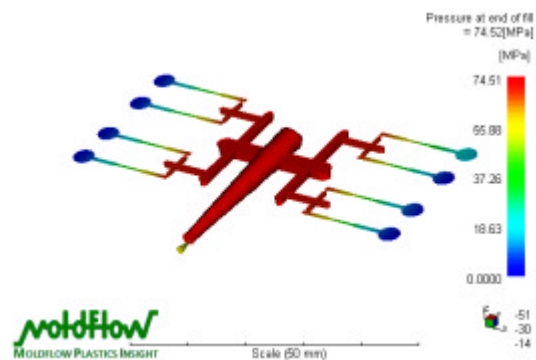


Figura 4.12 – Pressão no final do enchimento

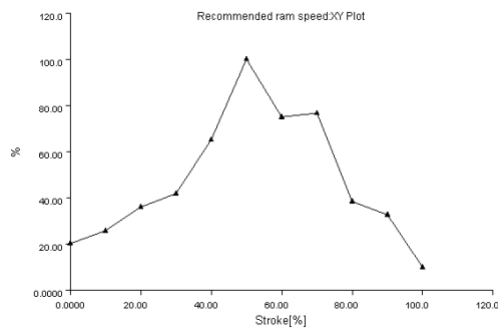


Figura 4.13 – Perfil de velocidade de injeção recomendado pelo MoldFlow MPI.

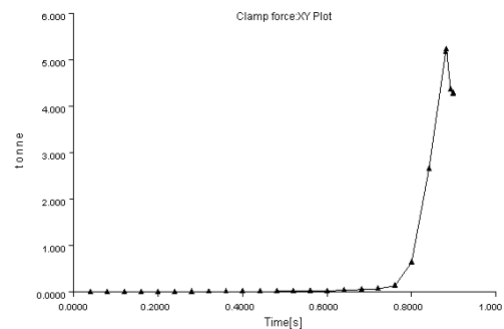


Figura 4.14 – Força de fecho requerida.

A análise de enchimento, após optimização, foi feita impondo um tempo de enchimento de 0,8 segundos. Esta opção incrementou a velocidade de injeção, o que é desejável dado a geometria dos provetes, podendo ser considerados em termos de enchimento como paredes finas.

Os valores de pressão atingidos no enchimento estão dentro dos valores esperados e estão dentro dos valores experimentais obtidos por outros autores [3]. Em termos de capacidade por parte da unidade Plasdan EL27 em fornecer este nível de pressão para a injeção, o



equipamento permite atingir 2250bar (225Mpa). Pela análise de enchimento foi possível obter um valor máximo para a pressão de injeção de cerca de 930bar, pelo que o equipamento neste aspecto, cumpre os requisitos necessários.

A força de fecho máxima requerida é inferior a 6 toneladas, estando portanto dentro da capacidade da máquina de injeção D80, cuja força de fecho máxima é 80 toneladas.

4.3.2. Cavidades

As cavidades (Figuras 4.15 e 4.16) são realizadas em duro-alumínio Hokotol Hogal 7500, com uma dureza 179HB. A escolha deste material deveu-se não só a critérios relacionados com a sua resistência mecânica mas essencialmente com a sua condutibilidade térmica.

Devido ao objectivo de permitir a intermutabilidade simples das cavidades, estas são realizadas em postigos amovíveis. A geometria adoptada para estes faz com que tenham de ser montados antes de unir as chapas que lhes servem de suporte, dispensando contudo, qualquer elemento de aperto, o que permite poupar algum espaço no molde.

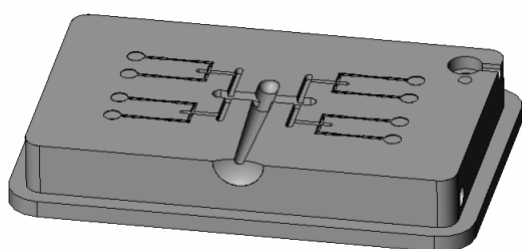


Figura 4.15 – Modelo 3D do inserto da cavidade 1

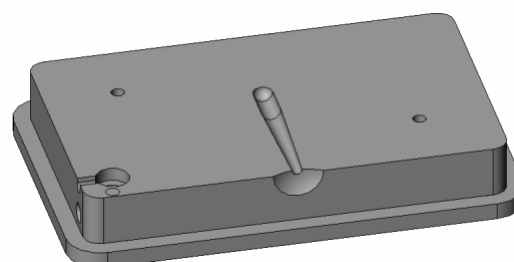


Figura 4.16 – Modelo 3D do inserto da cavidade 2

A alimentação, enquanto sistema funcional, encontra-se totalmente incluída nas cavidades. Nas Figuras 4.15 e 4.16 é possível observar a concavidade de encosto com raio de 15mm que se forma para receber o bico da unidade Plasdan EL27 (Figura 4.17), quando as duas cavidades estão fechadas.



Figura 4.18 – Resistências planas para aplicação por trás da cavidade 1.

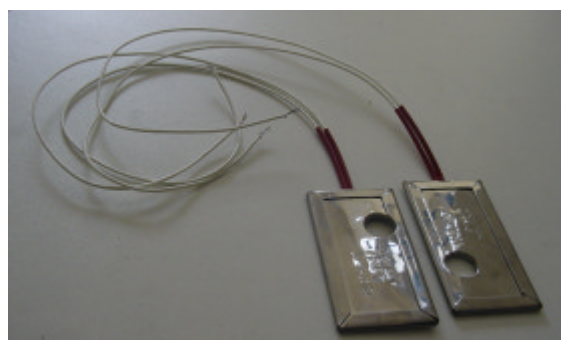


Figura 4.19 – Resistências planas para aplicação por trás da cavidade 2, veja-se a furacção para as sondas Kistler.

Para a cavidade 2, dado que esta possui montadas as duas sondas de pressão/temperatura, ambas as resistências que ficam por trás tiveram de ser feitas considerando um orifício para a sonda e para o respectivo cabo (Figura 4.19).

A opção por duas resistências em vez de uma só, foi motivada pela necessidade de prevenir o esmagamento das resistências pela flexão da cavidade, sob a acção da pressão de injecção. Ao criar as duas caixas, estas ficam separadas por uma zona que suportará a maior parte da força provocada pela pressão de injecção e que simultaneamente, reduz a flexão da cavidade (Figura 4.20).

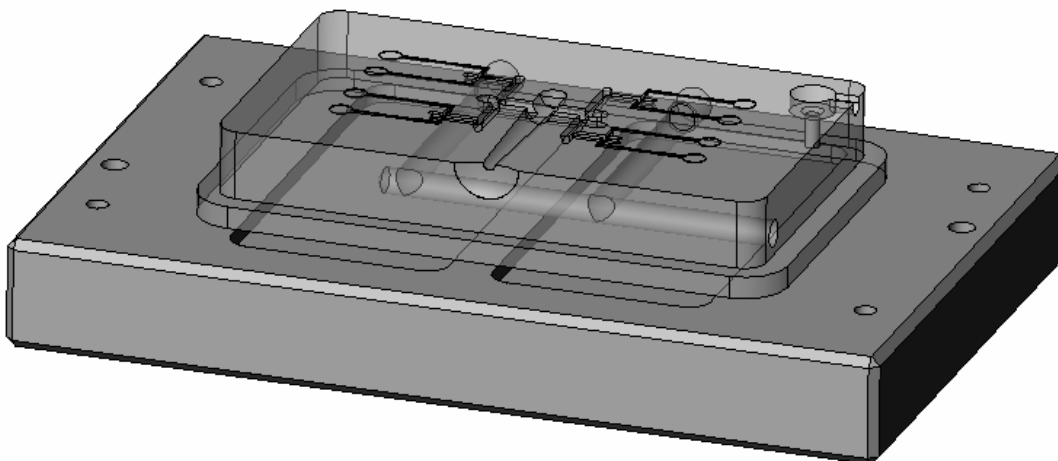


Figura 4.20 – Modelo 3D da chapa de aperto da cavidade 1, onde se podem ver as duas caixas destinadas a alojar as resistências planas e a zona central que serve de apoio ao inserto da cavidade para minimizar a flexão deste.



O controlo da temperatura das resistências está dividido em duas zonas, uma para cada cavidade. Cada uma dessas zonas é controlada por um controlador de temperatura independente (Figura 4.21).

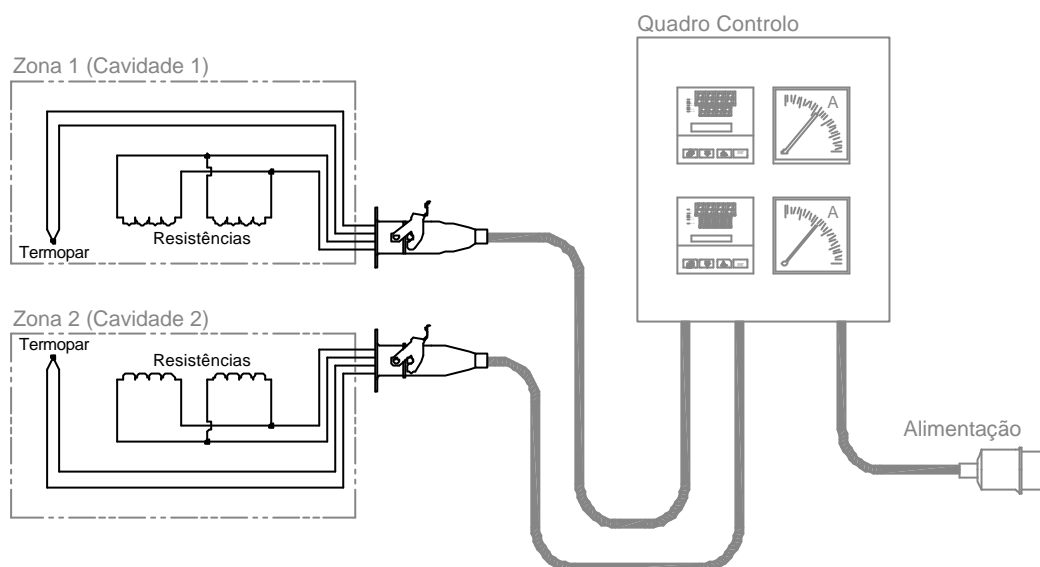


Figura 4.21 – Esquema eléctrico de ligações das resistências planas e do respectivo agrupamento em zonas de temperatura, controladas individualmente



Figura 4.22 – Quadro de controlo

A utilização de um controlador por cada zona de temperatura permite o estudo do processamento em várias condições de temperatura para cada uma das cavidades. Cada uma delas possui montado um termopar do tipo K, posicionado na superfície de junta da cavidade de forma a poder obter uma leitura mais fidedigna.

Os dois controladores de temperatura estão montados no quadro de controlo indicado na Figura 4.22.

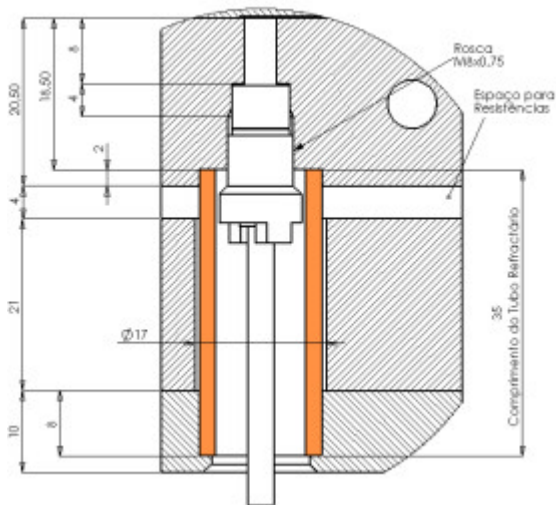


Figura 4.23 – Detalhe de montagem da sonda Kistler 6190A no molde, protegida por um tubo refractário.

Para se evitar qualquer problema de excesso de temperatura nas sondas, foram tomadas precauções, foi incluído na montagem um tubo refractário para permitir que o cabo da sonda atravessasse a zona das resistências sem que sofra efeitos adversos por excesso de temperatura (Figura 4.23). A cablagem de resistências e termopares, em ambas as partes do molde, é direccionada para fichas de conexão tipo “Harting” de 4 pinos, existentes em cada lado.

Desta forma, é possível manusear facilmente o molde sem interferência da cablagem eléctrica e simplificar as respectivas operações de conexão e desconexão.

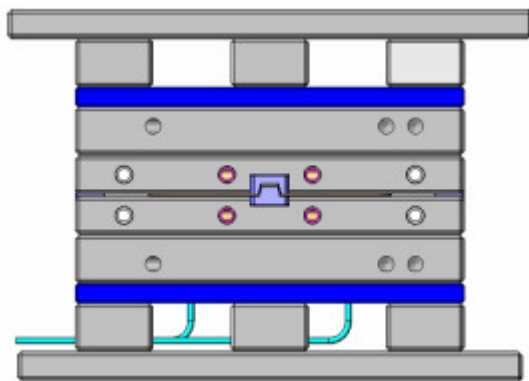


Figura 4.24 – Lateral do molde, onde se vêem assinaladas a azul as placas isolantes de 10mm.

Para limitar as perdas por condução para a restante estrutura do molde, foram introduzidas duas placas isolantes de 10mm, cada uma colocada por trás da chapa de aperto de cada uma das cavidades (Figura 4.24). Para minimizar as pontes térmicas, as áreas de contacto por trás das placas isolantes foram reduzidas



No que respeita ao arrefecimento, existem do lado de cada cavidade, três circuitos de refrigeração:

- Circuito de refrigeração da cavidade (Figuras 4.25 e 4.26),
- Circuito de refrigeração da chapa suporte da cavidade (Figura 4.27),
- Circuito de refrigeração da chapa de aperto da cavidade (Figura 4.28).

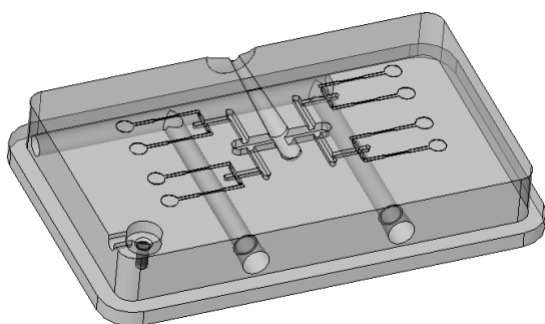


Figura 4.25 – Modelo 3D em transparência da cavidade 1

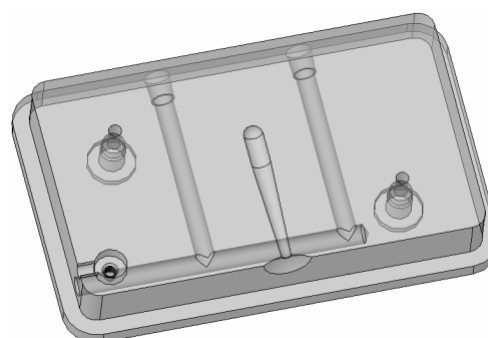


Figura 4.26 – Modelo 3D em transparência da cavidade 2

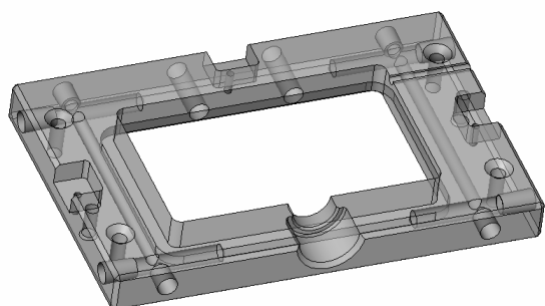


Figura 4.27 – Modelo 3D em transparência da chapa suporte das cavidades 1 e 2.

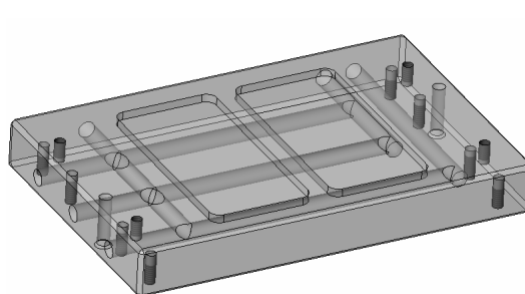


Figura 4.28 – Modelo 3D em transparência da chapa de aperto das cavidades 1.

Os três circuitos possuem entradas e saídas independentes, pelo que podem ser utilizados em conjunto ou em separado, consoante o nível de refrigeração que se pretender testar no processo de injeção.

As conexões separadas para cada circuito permitem também a utilização de fluidos refrigerantes diferentes para cada circuito ou o mesmo fluido mas com temperaturas diferentes. Todos os circuitos são executados em furos de $\varnothing 8\text{mm}$.



Nas chapas de suporte das cavidades, devido à zona maquinada para a entrada do bico da unidade de injeção, a refrigeração tem de ser feita por dois circuitos simétricos e independentes. Em cada um deles estão montadas duas lâminas para forçar a refrigeração em cascata.

Em qualquer dos casos, conforme se pode constatar na Figura 4.29, a refrigeração está totalmente direccionada para a parte traseira do molde considerando a sua posição de operação, ou seja, oposta ao operador.

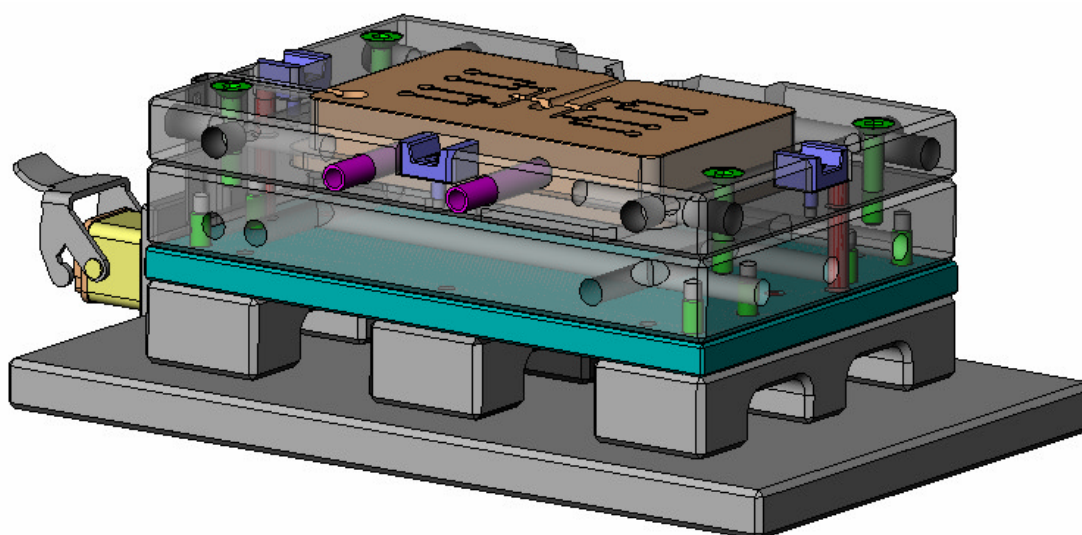


Figura 4.29 – Modelo 3D com as chapas suporte e de aperto da cavidade 1 em transparência.



4.3.4. Escape de Gases

A análise de enchimento realizada no software Moldflow fornece uma previsão da localização das prisões de ar. Estas surgem nos locais esperados, isto é, nos topos dos poços frios dos canais de alimentação e na extremidade das peças moldadas, ou seja, já na zona onde em duas das cavidades estão localizadas as sondas de pressão/temperatura (Figura 4.30).

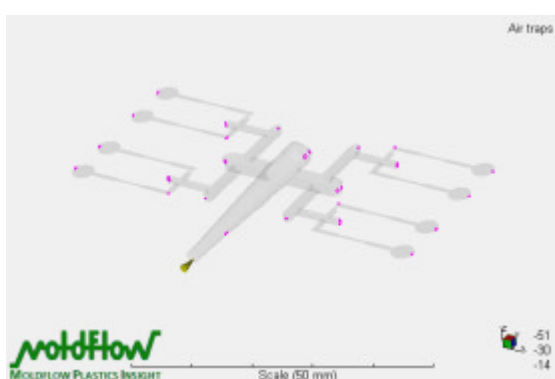


Figura 4.30 – Localização de prisões de ar obtidas no software Moldflow MPI

Face aos resultados da análise, foram realizados escapes de gases apenas nas extremidades das peças moldadas de modo a evitar a ocorrência de material queimado. Dada a natureza do processo de injecção a utilizar, os escapes de gases possuem, na zona próxima da cavidade, a profundidade máxima de 0,01mm, aumentando depois para 0,3mm.

4.3.5. Centragem / Guiamento

Outro sistema funcional, normalmente presente num molde clássico mas aqui dispensado neste estudo é o guiamento. A baixa razão de aspecto das peças moldadas e a presença de travamento no molde para assegurar o correcto alinhamento de ambas as partes permite ignorar a necessidade de guiamento, até porque esta acaba por ser garantida com os blocos de travamento prismáticos, cuja altura é superior a qualquer das cavidades.

A utilização de um sistema de guiamento clássico, mesmo que adequado para estas dimensões, seria demasiado volumoso. Para uma aplicação de grande tiragem, a presença desse sistema talvez se revelasse útil contudo, tal só se justifica quando existirem proeminências na bucha ou



na cavidade, sempre que a altura for baixa, o sistema de travamento cumprirá bem as duas funções (Figuras 4.31 e 4.32).

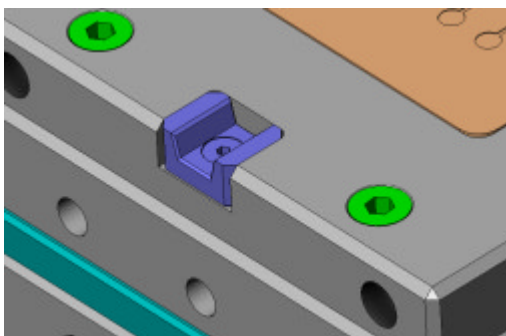


Figura 4.31 – Modelo 3D do bloco de travamento fêmea, montado no lado da cavidade 1.

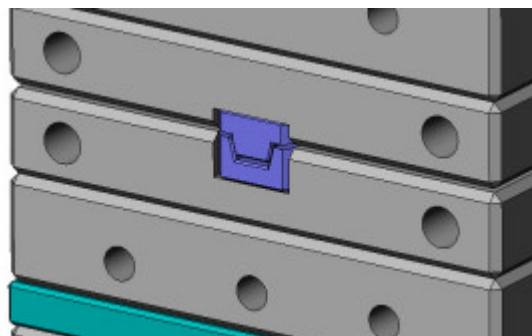


Figura 4.32 – Modelo 3D do conjunto dos blocos de travamento montados.

4.3.6. Extracção

Tendo este molde o carácter de ferramenta de teste e não de uma ferramenta para uma aplicação industrial, prescindiu-se do sistema de extracção. Atendendo à fragilidade das peças, considerou-se que não seria possível extrair-las automaticamente sem as danificar. A função é obviamente necessária, recorrendo-se para isso à extracção manual.

A utilização de um sistema de extracção à semelhança do utilizado em termos convencionais dependerá grandemente da geometria das peças e da resistência que eles possuírem para poderem ser extraídas por um sistema mecânico pertencente ao próprio molde.

As soluções que se encontram actualmente nos equipamentos de micro-injecção dependem sempre de um sistema de extracção independente, actuado externamente e que faz a extracção da moldação pelo plano de junta, com o molde aberto no final do ciclo [5]. A eficácia desta solução é elevada, o sistema pode assegurar a desjitagem mas utiliza sucção para segurar a moldação de forma a não a danificar e realiza a paletização dos micro-componentes moldados



4.4. Estrutura do Molde

A estrutura do molde (Figura 4.33) é quase simétrica relativamente ao plano de junta. As diferenças verificadas surgem essencialmente pela existência das sondas de pressão num dos lados.

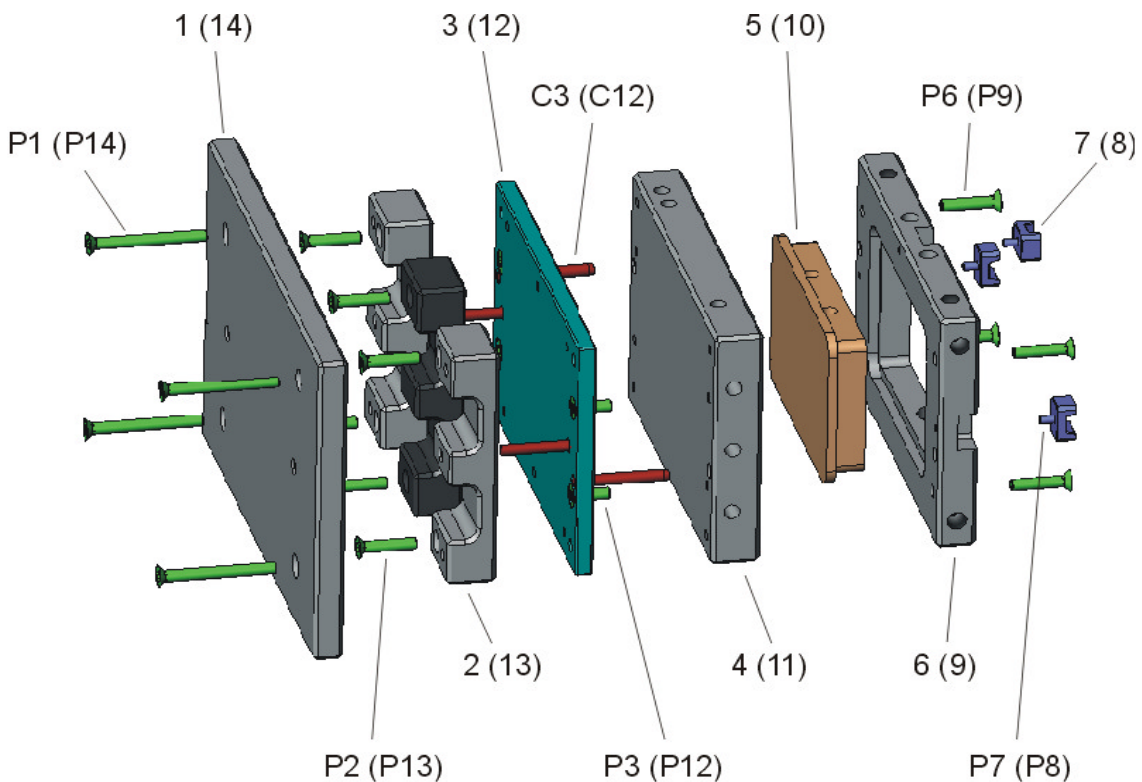


Figura 4.33 – Modelo 3D em vista explodida de uma metade do molde.

A constituição de uma metade do molde é visível na vista explodida da Figura 4.33. A não inclusão de elementos de guiamento clássicos obrigou ao encavilhamento de todas as chapas. A adopção de parafusos de cabeça de embutir permite poupar algum espaço dada a menor volumetria da sua cabeça.

A utilização dos espaçadores permite não apenas facilitar a passagem de cablagem vinda do interior do molde como também diminui a área de contacto com o resto do molde, minimizando dessa forma as pontes térmicas.



A estrutura base do molde é assim constituída pelos componentes descritos na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Lista de componentes da estrutura do molde

Referência	Designação	Quantidade	Material
1	Chapa de Fixação - Cavidades	1	1.1730
2	Espaçador - Cavidades	3	1.1730
3	Chapa Isolante - Cavidades	1	REROM A60.B
4	Chapa de Aperto da Zona Moldante - Cavidades	1	1.1730
5	Zona Moldante - Cavidades	1	Hokotol Hogal 7500
6	Chapa Suporte da Zona Moldante - Cavidades	1	1.1730
7	Blocos de Travamento Fêmea	3	Dureza 48-50HRC
P1	Parafuso da Chapa de Fixação - Cavidades	4	
P2	Parafuso do Espaçador - Cavidades	6	
P3	Parafuso da Chapa Isolante - Cavidades	2	
C3	Cavilha - Cavidades	4	
P6	Parafuso da Chapa Suporte - Cavidades	4	
P7	Parafuso do Bloco de Travamento Fêmea	3	
8	Blocos de Travamento Macho	3	Dureza 48-50HRC
9	Chapa Suporte da Zona Moldante - Sondas	1	1.1730
10	Zona Moldante - Sondas	1	Hokotol Hogal 7500
11	Chapa de Aperto da Zona Moldante - Sondas	1	1.1730
12	Chapa Isolante - Sondas	1	REROM A60.B
13	Espaçador - Sondas	3	1.1730
14	Chapa de Fixação - Sondas	1	1.1730
P8	Parafuso do Bloco de Travamento Macho	3	
P9	Parafuso da Chapa Suporte - Sondas	4	
P12	Parafuso da Chapa Isolante - Sondas	2	
C12	Cavilha - Sondas	4	
P13	Parafuso do Espaçador - Sondas	6	
P14	Parafuso da Chapa de Fixação - Sondas	4	



4.5. Montagem da Unidade de Injecção

A adaptação da unidade de co-injecção Plasdan EL27 ao molde projectado e a unidade envolve um terceiro equipamento para garantir o fecho deste. Este equipamento é a máquina de injecção D80 (Figura 4.34), que assegurará a função de fecho do molde e os seus dispositivos de regulação da refrigeração. Estes serão conectados ao molde e utilizados para controlar os seus circuitos de refrigeração (Figura 4.35).



Figura 4.34 – Máquina de Injecção D80 do Laboratório de Tecnologia Mecânica da ESTG Leiria.



Figura 4.35 – Regulação da Refrigeração da Máquina de Injecção D80.

Dadas as exíguas dimensões do molde face aos equipamentos utilizados, houve necessidade de criar uma interface comum aos equipamentos e ao molde.

Normalmente, uma unidade de co-injecção é acoplada directamente ao molde, o que considerando um molde de dimensões convencionais, é perfeitamente possível. Neste caso, a unidade de co-injecção irá ser usada como unidade de injecção principal o que coloca outro problema relacionado com a abertura do molde, uma vez que a unidade de co-injecção vai injectar à junta.

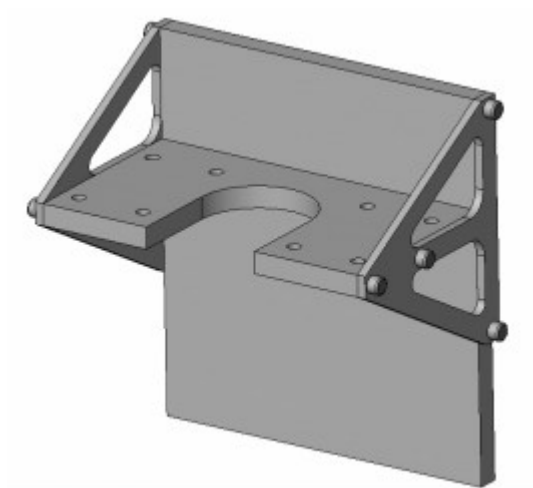


Figura 4.36 – Modelo 3D da estrutura de interface entre o molde e a unidade de co-injecção

Deste modo, com o intuito de suportar a unidade de co-injecção, foi criada uma pequena estrutura que, quando aplicada ao molde, o vai solidarizar com a unidade de co-injecção, não interferindo na abertura deste (Figura 4.36).

Esta estrutura prevê a furacção para fixação do molde e para a fixação da unidade de co-injecção. Após a montagem de todos os equipamentos, o conjunto poderá então ser montado na máquina de injecção D80.

A largura desta estrutura foi projectada de forma a garantir que todo o conjunto poderia ser montado na máquina D80, que possui uma distância útil entre colunas de 360mm.

A chapa horizontal da estrutura possui não apenas a furacção para a fixação da unidade de co-injecção como também um rasgo para permitir que o bico da unidade avance relativamente à própria fixação (Figura 4.37).

A chapa principal da estrutura de interface será utilizada para fixar o lado do molde que incorpora as cavidades ao prato de injecção da máquina de injecção D80 enquanto que o lado das sondas de pressão será fixo directamente no prato de extracção (Figura 4.38).

Nesta chapa serão ainda fixadas as caixas de sinal das sondas de pressão. Os triângulos de reforço da estrutura são furados para permitir a colocação de grampos de fixação ao prato de injecção naquelas zonas da chapa.



Figura 4.37 – Fotografia do bico de injeção da unidade de co-injecção Plasdan EL27

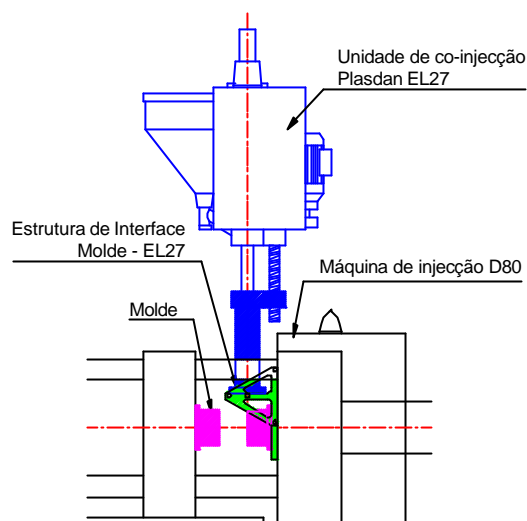


Figura 4.38 – Diagrama esquemático da montagem da estrutura de interface, o molde e a unidade de co-injecção na máquina de injeção D80.

Nas Figuras 4.39 apresenta-se o conjunto molde-estrutura de interface montado e na Figura 4.40 ilustra-se o pormenor do rasgo realizado para permitir o avanço do bico de injeção da unidade de co-injecção Plasdan EL27.

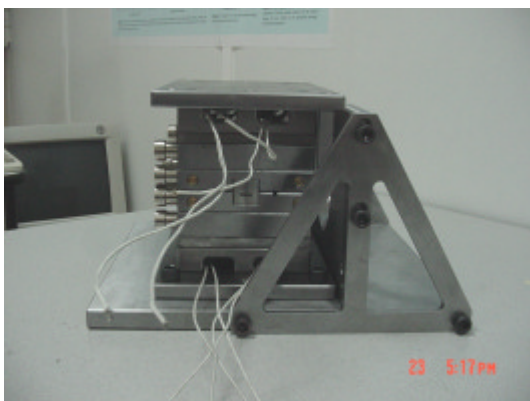


Figura 4.39 – Fotografia do conjunto molde-estrutura interface montado

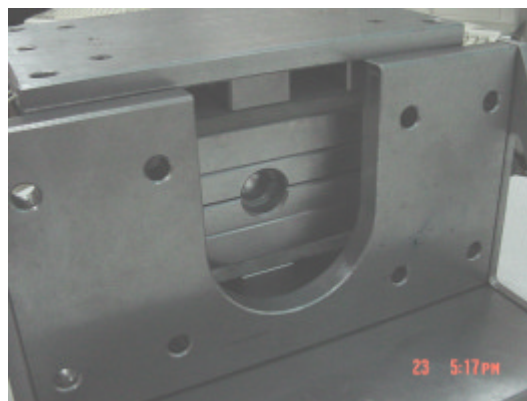


Figura 4.40 – Pormenor do rasgo realizado para permitir o avanço do bico de injeção



4.6. Referências

- [1] Plastic Measurement Technology; Kistler AG; Data-sheet da sonda 6190; acedido a 24-02-2006 em http://www.kistler.com/do.productfinder.gb.en-gb?content=13_Productfinder¶m=App.6190A0%2C4
- [2] Cunha, A.; Moldação por Injecção e Materiais Plásticos; Manual do Projectista para Moldes de Injecção de Plástico, Vol.2: Centimfe; 2003
- [3] Yuan, S.; Hung, N. P.; Ngoi, B. K. A.; Ali, M. Y.; Development of Microreplication Process – Micromolding; *Materials and Manufacturing Process*, Vol. 18, Nº 5, 731-751, 2003
- [4] Injection Unit Specifications; Plasdan Group; acedido a 24-02-2006 em <http://www.plasdan.pt/portal/index.php>
- [5] Ruprecht, R.; Finnah, G.; Piotter, V.; Microengineering of Metals and Ceramics Part I: Design, Tooling and Injection Molding; Wiley-VCH; Microinjection Molding – Principles and Chanllenges; 253-262; 2005
- [6] SMS Plastic Technology; SMS Group; Microsystem 50 Brochure; acedido a 24-02-2006 em http://www.sms-k.com/SMS_Startframe/SGT-Startframe_engl/SGT-Startframe_engl.htm



5. Resultados Experimentais – Micro-Fabricação

5.1. Introdução

Para além das cavidades obtidas por *Laser Milling* em duro-alumínio Hokotol Hogal 7500, foram ainda realizados testes com outros materiais de uso comum na indústria de moldes como:

- Aço temperado
- Cobre electrolítico
- Grafite (grão fino)

Estes testes visaram estabelecer uma relação entre os parâmetros operatórios do processo e o acabamento superficial das estruturas obtidas.

Neste Capítulo descrevem-se os resultados obtidos assim como o estudo da área termicamente afectada por recurso a termografia por infravermelhos e simulação numérica.

5.2. Acabamento versus Remoção de Material

À semelhança de qualquer outro processo tecnológico de corte por arranque de apara, também no processo *Laser Milling* é necessário estabelecer um compromisso entre produtividade e acabamento superficial. Embora o *Laser Milling* possa ser considerado uma tecnologia de fim de linha, ou seja, findo o processamento ter-se-á um componente pronto a utilizar, a opção por taxas de remoção de material elevadas salda-se no final pela eventual obtenção de rugosidades elevadas.

Com intuito de determinar entre que parâmetros é razoável operar, mantendo taxas de remoção de material tão elevadas quanto possível e procurando que a rugosidade se mantenha dentro de valores aceitáveis, foram realizados testes detalhados em aço temperado.



Os parâmetros operatórios e de funcionamento de uma operação de *Laser Milling* são:

- Corrente de Lâmpada [L_s],
- Frequência de Impulso [F_q],
- Velocidade de Varrimento [V_g],
- Q-Switch [Os],
- Distância entre varrimentos [d] e
- Ângulo dos varrimentos [β]

Com a excepção do parâmetro Q-Switch, todos os outros parâmetros foram objecto de análise.



Figura 5.1 – Rugosímetro Mahr Marsurf M2

Os testes consistiram na realização de várias cavidades de dimensão igual (25x5mm), onde foram definidos parâmetros diferentes em cada uma, realizadas em aço temperado.

A dimensão escolhida para as cavidades deveu-se à necessidade de realizar medições de rugosidade com um rugosímetro de contacto (Anexo A2).

5.2.1. Avaliação da Rugosidade

Os conjuntos de parâmetros utilizados para o aço temperado (Tabela 5.1) foram obtidos a partir de dados sugeridos pelo fabricante do equipamento, contudo, foram feitas algumas alterações com o objectivo de avaliar a sua influência nos resultados finais.



Tabela 5.1 – Parâmetros utilizados para Aço Temperado

Operação	Velocidade V_g	Frequência F_q	Corrente L_s
ST001	300 mm/s	25 kHz	28 A
ST002	300 mm/s	25 kHz	29,5 A
ST003	200 mm/s	25 kHz	29,5 A

Para além dos parâmetros base, o valor do QSwitch foi mantido constante, com o valor de 1,5mm. Esta opção deveu-se ao facto do fabricante do equipamento recomendar este valor de Q-Switch como ideal em termos da relação produtividade-acabamento superficial.

Os parâmetros relativos à estratégia de varrimento (distância entre varrimentos e o respectivo ângulo) foram analisados de modo a determinar-se qual o binómio de resultados que proporciona um melhor acabamento.

O incremento angular foi realizado com o intuito de minimizar o efeito de orientação de estrias, claramente notório quando se realiza o varrimento sempre na mesma direcção.

Com esse objectivo, o incremento é feito para cumprir 180°, razão pela qual o incremento angular de 60° necessita de três varrimentos e o incremento angular de 18° necessita de 10 incrementos angulares (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 – Distâncias entre varrimentos, ângulos iniciais e incrementos angulares normalmente utilizados.

Estratégia	Distância d	Ângulo inicial β	Incremento Angular
Scan1		0°	60° (x3)
Scan2	0,01 a 0,07mm	10 a 90°	60° (x3)
Scan3		0°	18° (10)

Os testes foram realizados na placa de Aço Temperado mostrada na Figura 5.2.



Figura 5.2 – Fotografia da placa de testes em Aço Temperado

A análise experimental para avaliação da rugosidade compreendeu três testes:

- Teste 1: Análise das diferenças no acabamento em função da corrente de lâmpada e a velocidade de varrimento
- Teste 2: Avaliação da rugosidade e do tempo de processamento em função da variação do espaçamento entre varrimentos consecutivos
- Teste 3: Avaliação do efeito de orientação das estrias na rugosidade final das cavidades obtidas.

5.2.1.1. Avaliação de Rugosidade: Teste 1

No primeiro conjunto de parâmetros, utilizado nas cavidades A, D e E, ilustradas na Figura 5.2, é mantida sempre a mesma frequência de 25kHz, variando entre eles apenas a velocidade de varrimento e a corrente de lâmpada (Tabela 5.3).

No segundo conjunto de parâmetros, utilizado nas cavidades H, I e J, são usados sempre os parâmetros associados à operação ST001, variando-se a estratégia de varrimento em termos de ângulos iniciais e incrementos angulares. A distância entre varrimentos consecutivos é mantida constante (Tabela 5.4).



Tabela 5.3 – Parâmetros utilizados nas cavidades A, D e E.

Cavidade	A	D	E
Operação	ST001	ST002	ST003
d [mm]	0,02	0,02	0,02
β	0°	0°	0°
Increment.	60° (x3)	60° (x3)	60° (x3)

Tabela 5.4 – Parâmetros utilizados nas cavidades H, I e J.

Cavidade	H	I	J
Operação		ST001	
d [mm]		0,02	
β	10°	0°	90°
Increment.	60° (x3)	18° (x10)	60° (x3)

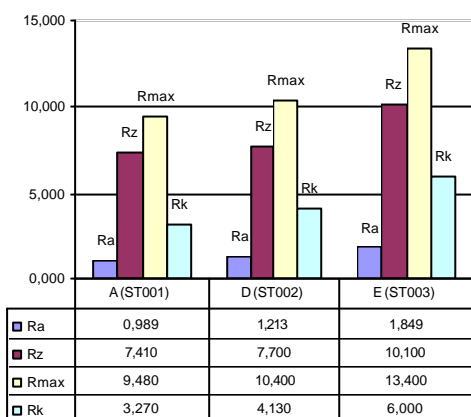


Figura 5.3 – Gráfico de rugosidades medidas nas cavidades A, D e E (valores em μm).

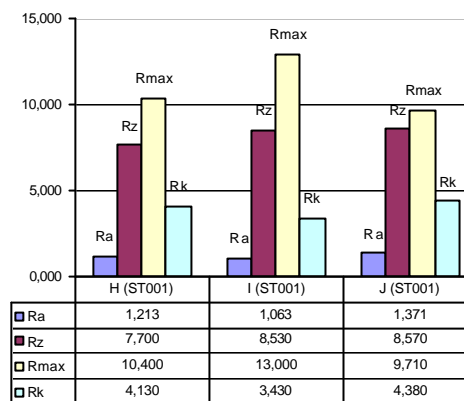


Figura 5.4 – Gráfico de rugosidades medidas nas cavidades H, I e J (valores em μm).

Na comparação entre as operações ST001, ST002 e ST003 (Figura 5.3), sobressai o maior valor de rugosidade notado na cavidade E, fruto da mais baixa velocidade de varrimento utilizada.

Nota-se igualmente algum acréscimo na rugosidade entre as cavidades A e D, resultado da maior potência aplicada dado que a corrente de lâmpada para a operação ST002 é cerca de 5% superior.

Na comparação entre estratégias de varrimento (Figura 5.4), os incrementos angulares de 60° resultam em valores semelhantes de rugosidade independentemente do ângulo inicial. Privilegiando o valor de R_k como indicador do melhor estado de superfície, é notório o melhor desempenho com os 10 incrementos de 18°, isto apesar de verificar o valor de R_{max} mais elevado do comparativo. Contudo, tal deve-se a picos no perfil de rugosidade (Figura 5.5) que não são representativos do estado de toda a superfície (Anexo A2).

Importa salientar que a realização de 10 incrementos angulares tem implicações ao nível do tempo de processamento que podem ser importantes.

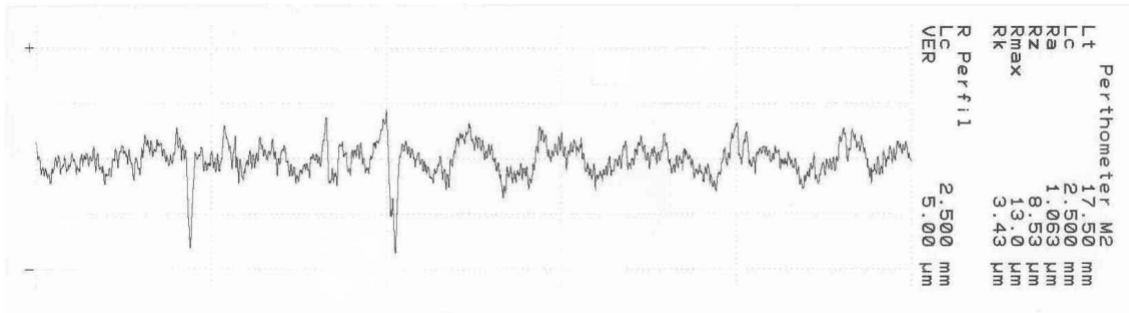


Figura 5.5 – Perfil de rugosidade da cavidade I obtido no rugosímetro Mahr Marsurf M2

Note-se que o efeito de orientação de estrias que poderia influenciar fortemente os valores da rugosidade deixa assim de se fazer sentir devido aos varrimentos com incremento angular.

5.2.1.2. Avaliação de Rugosidade: Teste 2

A escolha dos parâmetros associados à estratégia de varrimento influencia fortemente a produtividade do processo. Deste modo, procedeu-se à avaliação da distância entre varrimentos e a sua influência na rugosidade assim como no tempo de processamento.

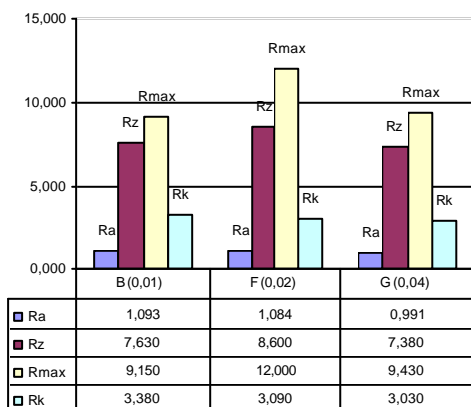


Figura 5.6 – Gráfico de rugosidades medidas nas cavidades B, F e G (valores em µm).

Para esse efeito, utilizando sempre a operação ST001, foram realizadas as cavidades B (d=0,01mm), F (d=0,02mm) e G (d=0,04mm), para análise.

Os resultados experimentais mostram que o aumento da distância entre varrimentos não contribui para o aumento da rugosidade, tal como se mostra na Figura 5.6. Verifica-se mesmo que para a cavidade G, em que utilizou a maior distância entre varrimentos, foram obtidos os melhores valores que caracterizam o seu estado superficial.



Estes resultados permitem pois concluir que o acabamento superficial não é necessariamente posto em causa pela utilização de parâmetro de operação mais agressivos.

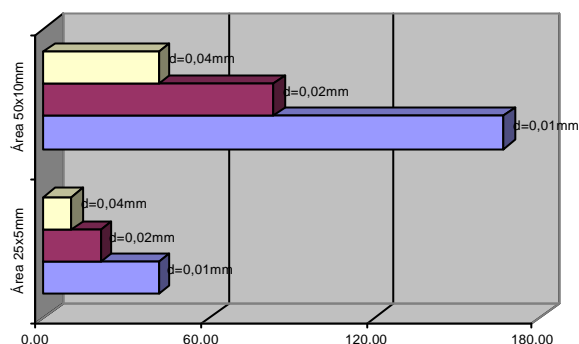


Figura 5.7 – Estimativa de tempos de processamento de cavidades com 25x5mm e 50x10mm, utilizando as mesmas distâncias entre varrimentos das cavidades B, F e G mas com apenas um varrimento (valores em segundos).

À semelhança do que acontece em qualquer processo de maquinação convencional, a selecção cuidada de parâmetros operatórios otimiza o desempenho do processo.

A análise apresentada na Figura 5.7 reflecte as diferenças no tempo estimado de processamento de uma camada apenas em duas cavidades de exemplo, com as dimensões de 25x5mm e 50x10mm.

Assumindo a velocidade de varrimento prevista na operação ST001 (300mm/s) e conhecendo a dimensão da área a processar, é possível realizar uma estimativa do tempo consumido numa única camada.

Estas diferenças na produtividade são tanto mais notórias quanto maiores forem as áreas a processar e conseqüentemente, a quantidade de varrimentos a executar. Atendendo ao facto da qualidade da superfície não estar a ser posta em causa para os valores testados e dado que o valor de R_x apresentado ronda os $3\mu\text{m}$, a escolha de uma distância de varrimento acertada desempenha um papel importante na optimização do processo.

Com o intuito de validar esta tendência, foi realizada uma segunda série de testes, em tudo semelhantes ao anterior, incluindo um valor de distância de varrimento superior para se analisar a evolução da tendência. Como se pode ver na Tabela 5.5, as cavidades N, O e P mantêm os parâmetros aplicados nas cavidades B, F e G do teste anterior enquanto que na cavidade Q foi aplicada uma distância entre varrimentos de 0,07mm.



Tabela 5.5 – Parâmetros utilizados nas cavidades N, O, P e Q

Cavidade	N	O	P	Q
Parâmetros	ST001			
d [mm]	0,01	0,02	0,04	0,07
β	0°			
Incremento	60° (x3)			

Conforme se pode constatar na Figura 5.9 e tal como esperado, verifica-se que a rugosidade não se reduz indefinidamente à medida que a distância entre varrimentos é incrementada. Nota-se contudo nesta segunda série de testes que o valor de 0,04mm na cavidade P (Figura 5.12) surge de novo como sendo o óptimo, ou seja, mostrando mais uma vez os valores de rugosidade mais baixos de todo o comparativo. Na Figura 5.8 são mostrados os resultados obtidos.

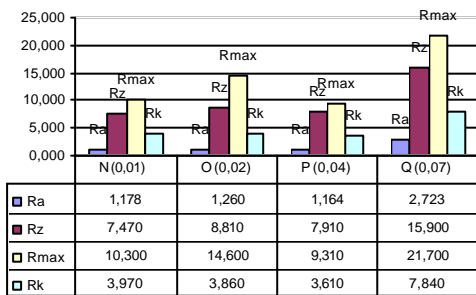


Figura 5.8 – Gráfico de rugosidades medidas nas cavidades N, O, P e Q (valores em μm).

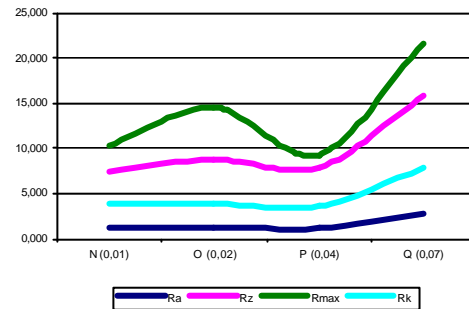


Figura 5.9 – Evolução da tendência da rugosidade com o aumento da distância entre varrimentos

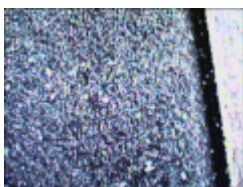


Figura 5.10 – Foto 50x da Cavidade N



Figura 5.11 – Foto 50x da Cavidade O



Figura 5.12 – Foto 50x da Cavidade P



Figura 5.13 – Foto 50x da Cavidade Q

Este resultado dever-se-á ao facto do laser não ser uma ferramenta física, isto é, o efeito do incremento lateral não é exactamente igual ao de uma fresa de topo. Enquanto que uma ferramenta física apenas corta o material que entra em colisão volúmica com a sua geometria, o



feixe laser somente será absorvido/reflectido quando encontrar material que interfira com o feixe. Isto significa que, no decurso da sua operação, o laser processará não apenas o novo varrimento como também processará a parcela do varrimento anterior que estiver sobreposta entre os dois varrimentos, o que pode contribuir para o aumento da rugosidade, dependendo dos parâmetros do laser e operatórios utilizados.

Atendendo à consideração anterior, a rugosidade obtida para a cavidade P poderá ser justificada pelo facto de o espaçamento de 0,04mm estar próximo do valor do diâmetro do feixe que segundo o fabricante do equipamento é de 0,05mm. Desta forma, a área de sobreposição entre varrimentos laterais consecutivos será menor, possibilitando a obtenção de rugosidades mais reduzidas.

5.2.1.3. Avaliação de Rugosidade 3

Nos testes anteriores, o efeito de orientação das estrias não foi considerado dado o incremento angular realizado para cada varrimento. Com o objectivo de avaliar a rugosidade nessas circunstâncias, foram maquinadas duas cavidades quadradas de 25x25mm com varrimentos numa só direcção e realizadas medições paralelas, perpendiculares e a 45° relativamente aos varrimentos realizados. Foram mantidos os parâmetros associados à operação ST001 e utilizadas as distâncias de varrimento de 0,02mm e 0,04mm respectivamente, para as cavidades 1 e 2. Os resultados são mostrados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Valores obtidos na medição das cavidades 1 e 2, realizadas com apenas um varrimento para análise do efeito de orientação das estrias decorrentes do processo *Laser Milling*

	Cavidade 1 (d = 0,02mm)			Cavidade 2 (d = 0,04mm)		
	Paralelo	Perpendicular	A 45°	Paralelo	Perpendicular	A 45°
R _a	0,953	1,626	1,796	0,910	1,623	1,662
R _z	6,533	10,967	11,900	6,090	10,617	11,267
R _k	2,980	5,240	5,690	2,967	5,143	5,163
R _{max}	8,520	13,067	13,833	7,233	13,933	13,767

Com excepção do valor de R_{max} na orientação perpendicular às estrias da cavidade 2, continuam a verificar-se melhores valores de rugosidade quando a distância entre varrimentos é de



0,04mm. Nota-se contudo, que as diferenças são agora muito ténues o que contribui para afirmar que os valores obtidos anteriormente são resultado dos 3 incrementos angulares realizados. No Teste 2 (ver Secção 5.2.1.2) há diferenças mais significativas em todos os parâmetros de rugosidade do que as agora verificadas, devido ao facto de ser sido realizada apenas uma passagem em cada cavidade. As cavidades 1 e 2, objecto desta avaliação são mostradas nas Figuras 5.14 e 5.15.



Figura 5.14 – Foto ampliada 50x da Cavidade 1

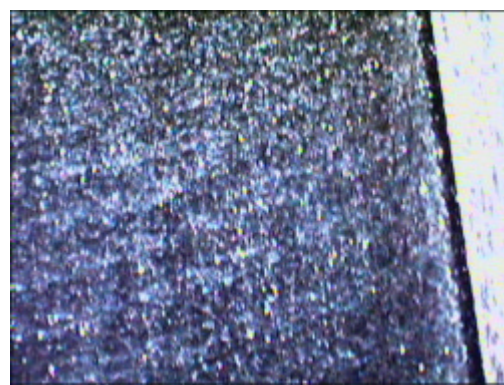


Figura 5.15 – Foto ampliada 50x da Cavidade 2

Como conclusão refira-se que esta opção por distâncias entre varrimentos maiores é apenas relevante no contexto do incremento da taxa de remoção material. A adopção de valores desta grandeza deverá ser ponderada em função da dimensão das estruturas a fabricar e da sua geometria. À semelhança do que acontece com ferramentas físicas, os incrementos laterais podem ser grandes se as zonas a maquinar forem totalmente planas. No seguimento de contornos tridimensionais, a situação altera-se devido à incapacidade de detectar material não removido na camada anterior.

No caso de micro-estruturas, a capacidade de um processo de micro-fabricação é ditada pela dimensão mínima que este consegue produzir e pela precisão com que o faz. No caso do processo *Laser Milling*, esta capacidade está limitada pelo diâmetro, focagem e convergência do feixe laser, assim como pela precisão de varrimento proporcionada pelo conjunto de espelhos galvanométricos. A elevada capacidade de remoção de material só faz sentido neste processo na perspectiva clara de substituição de outros processos de maquinação, como a electroerosão por penetração (ver Secção 2.4).



5.2.1.4. Avaliação da Remoção de Material

Para além dos testes realizados nas avaliações anteriores em aço temperado, foram realizados também testes no duro-alumínio a utilizar para as cavidades, em cobre electrolítico e em grafite de grão fino, normalmente utilizada para operações de acabamento em electroerosão para avaliar as taxas de remoção de material.

O conjunto de parâmetros em teste está descrito na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Parâmetros utilizados para cada material, nos testes de remoção de material

Material	Operação	Velocidade V_g	Frequência F_g	Corrente L_s
Aço Temperado	ST001	300 mm/s	25 kHz	28 A
	ST002	300 mm/s	25 kHz	29,5 A
	ST003	200 mm/s	25 kHz	29,5 A
Duro-Alumínio	AL001	300 mm/s	25 kHz	29 A
Cobre Electrolítico	CE001	250 mm/s	10 kHz	29,5 A
Grafite grão fino	GF001	200 mm/s	6 kHz	29 A

A avaliação da taxa de remoção de material foi feita com base na medição do volume de material removido e do tempo de operação do laser, dado pelo programa que o gere.

A medição do volume removido resume-se à medição da profundidade, uma vez que os testes foram todos eles realizados em cavidades de 25x5mm. Desta forma, puderam ser calculados vários valores para a taxa de remoção de material para cada material e determinada a média dos valores obtidos de forma a poderem ser apresentados em termos comparativos, para cada material e no caso particular do aço temperado, para diversos conjuntos de parâmetros.

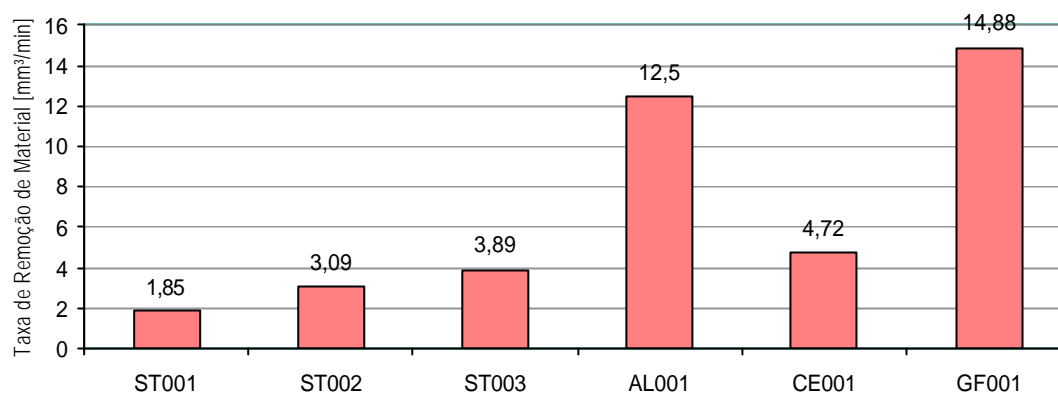


Figura 5.16 – Resultados dos testes de remoção de material realizados para Aço Temperado – ST001, ST002 e ST003; Alumínio – AL001; Cobre Electrolítico – CE001 e Grafite – GF001.



5.2.1.5. Avaliação da Rugosidade/Remoção de Material

A importância do compromisso entre o acabamento superficial e a taxa de remoção de material motivou uma análise comparativa dos resultados de rugosidade obtidos em função da corrente de lâmpada e da frequência de impulso utilizados no processamento. Esta análise foi realizada sobre os materiais mais utilizados em zonas moldantes para a indústria de moldes, o aço temperado e o mesmo duro-alumínio em que foram realizadas as cavidades para os micro-provetes.

Para a realização destes testes, foram realizadas cavidades com dimensões fixas de 22 x 4mm, dimensões estas, necessárias para se poder efectuar a medição da rugosidade na superfície maquinada com um comprimento de amostragem l_r de 17,5mm (Anexo A2). A estratégia adoptada para o varrimento foi mantida de outros testes anteriores. Para cada cavidade foram realizados três varrimentos, o primeiro a 0°, o segundo a 60° e o terceiro e último a 120°. Os resultados apresentados na Tabela 5.8 foram obtidos fixando alguns parâmetros, fazendo variar apenas a frequência de impulso e a corrente de lâmpada.

Tabela 5.8 – Parâmetros utilizados para cada material, nos testes comparativos entre a taxa de remoção de material e a respectiva rugosidade obtida para diversos valores de frequência de impulso e corrente de lâmpada.

Material	Velocidade V_g	Distância d	Frequência F_q	Corrente L_s	Taxa de Remoção	Rugosidade R_k
Aço temperado	200 mm/s	0,02 mm	23 kHz	29,5 A	0,0494mm ³ /s	9,01µm
			26 kHz		0,0439mm ³ /s	9,27µm
			29 kHz		0,0439mm ³ /s	9,56µm
	200 mm/s	0,02 mm	25 kHz	26 A	0,0220mm ³ /s	8,73µm
				28 A	0,0439mm ³ /s	9,08µm
				29,5 A	0,0494mm ³ /s	9,75µm
Duro-alumínio	300 mm/s	0,02 mm	12 kHz	29 A	0,1258mm ³ /s	21,0µm
			18 kHz		0,1184mm ³ /s	15,1µm
			25 kHz		0,0666mm ³ /s	14,3µm
	300 mm/s	0,02 mm	25 kHz	27 A	0,0296mm ³ /s	19,3µm
				28,5 A	0,0592mm ³ /s	17,3µm
				29,5 A	0,0814mm ³ /s	15,8µm



A distância entre varrimentos e o QSwitch foram mantidos respectivamente em 0,02mm e 1,5mm. Apenas as velocidades de varrimento adoptadas foram diferentes para ambos os materiais: 200mm/s para o aço temperado e 300mm/s para o duro-alumínio.

Analisando em detalhe as Figuras 5.17 a 5.20, obtidas a partir dos dados coligidos na Tabela 5.8, podem ser retiradas algumas conclusões relevantes para o processamento de materiais com esta técnica. As Figuras 5.17 e 5.18 referem-se ao processamento de aço temperado.

Os parâmetros indicadores do processo (taxa de remoção de material e rugosidade) mostram, tal como se indica na Figura 5.17 tendências similares. A rugosidade tende a estabilizar em regimes de frequência mais elevados, acima de 26kHz, o que aliado à maior remoção de material verificada, indica uma boa gama de operação para processos mais produtivos, onde se privilegie a remoção de material em detrimento da qualidade da superfície.

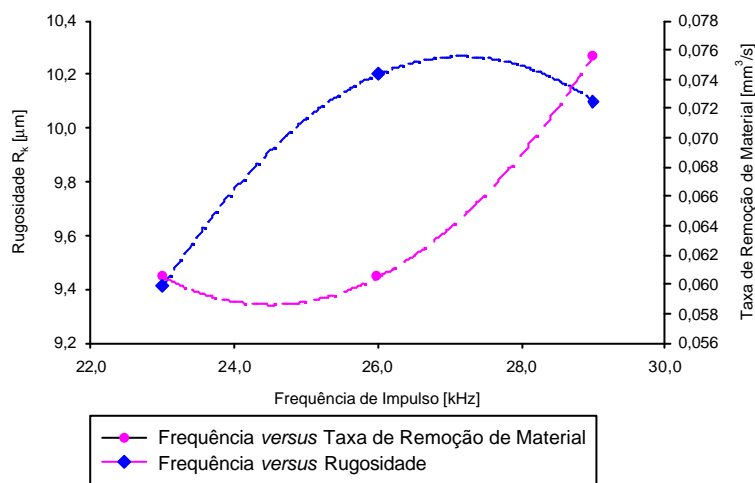


Figura 5.17 – Gráfico comparativo entre a taxa de remoção de material e a rugosidade em função da frequência de impulso no processamento de aço temperado

Na Figura 5.18 constata-se uma variação linear da taxa de remoção de material e da rugosidade com o aumento da potência do laser. À semelhança do que se verifica em processos convencionais de corte por arranque de aparas, também no processo *Laser Milling* se verifica a tendência crescente da rugosidade quando a taxa de remoção de material é elevada.

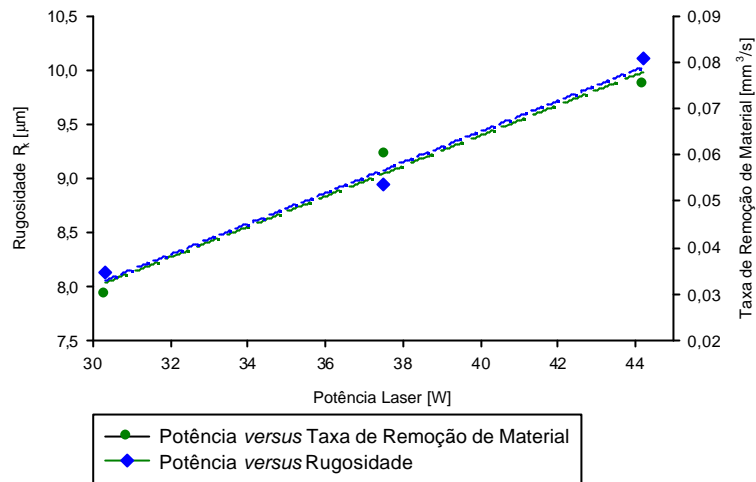


Figura 5.18 – Gráfico comparativo entre a taxa de remoção de material e a rugosidade em função da potência do laser no processamento de aço temperado

As Figuras 5.19 e 5.20 retratam os resultados obtidos para o duro-alumínio. No que se refere à influência da frequência de impulso (Figura 5.19), verifica-se para o duro-alumínio um decréscimo rápido da rugosidade até cerca dos 18kHz, altura a partir da qual quase estabiliza. Todavia, é a partir dessa mesma frequência que a remoção de material decresce também muito rapidamente, pelo que um valor próximo dos 18kHz otimiza o desempenho do processo.

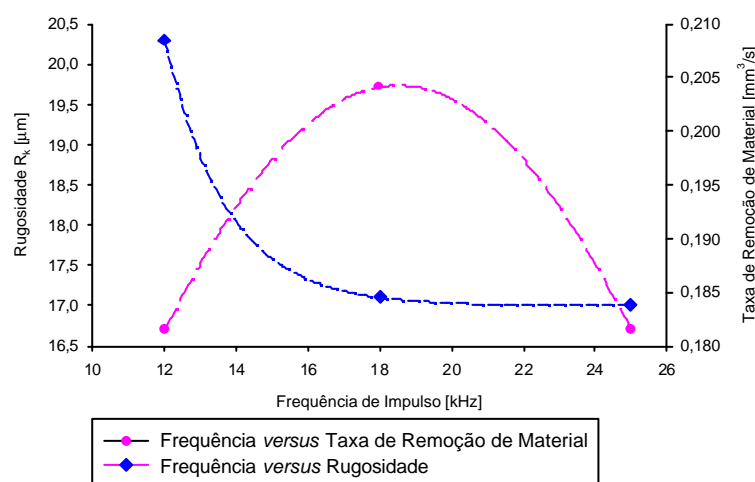


Figura 5.19 – Gráfico comparativo entre a taxa de remoção de material e a rugosidade em função da frequência de impulso no processamento de duro-alumínio



A variação da potência sobre o duro-alumínio (Figura 5.20) mostra um comportamento similar ao verificado sobre o aço temperado, ou seja, o aumento da potência favorece o incremento da taxa de remoção de material e por sua vez, o aumento da rugosidade.

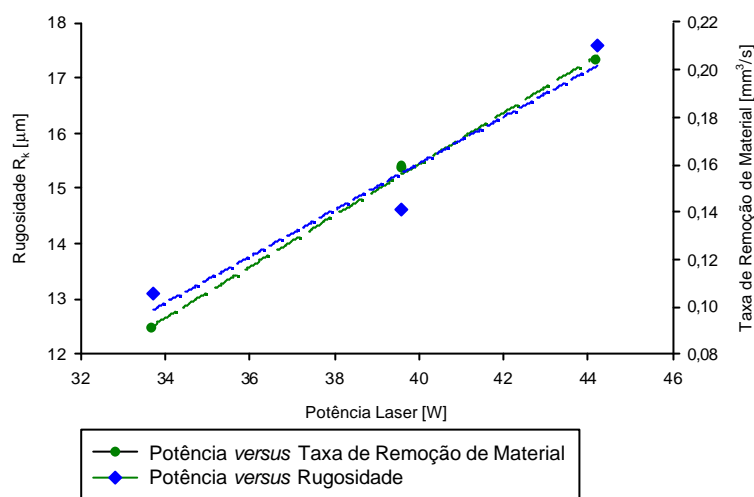


Figura 5.20 – Gráfico comparativo entre a taxa de remoção de material e a rugosidade em função da corrente de lâmpada no processamento de duro-alumínio

Em ambos os casos em que o parâmetro analisado era a frequência de impulso, foi possível verificar comportamentos diferentes para a evolução da taxa de remoção de material e da rugosidade. No aço temperado, a evolução mútua destas duas grandezas é tendencialmente crescente e convergente, algo que não acontece no duro-alumínio. Neste material ocorre um decréscimo acentuado da rugosidade à medida que se aumenta a frequência, contudo, este comportamento não é acompanhado pela taxa de remoção de material, que começa a diminuir na zona em que a rugosidade estabiliza, mostrando claramente uma zona de frequência onde o processo mostra pouca eficácia. Esta característica da frequência de impulso no processamento por *Laser Milling* do duro-alumínio poder-se-á dever à reflectividade do material. Esta propriedade óptica do material é dependente da temperatura [1] e dado que o processo *Laser Milling* é eminentemente térmico, o aumento da temperatura fará alterar a reflectividade do material, alterando o seu comportamento quando exposto à radiação.



Nos testes anteriores, foram avaliados os efeitos de dois parâmetros do laser no comportamento do processo *Laser Milling*. Estes foram realizados com velocidades de varrimento diferentes para os dois materiais em estudo, não permitindo assim avaliar o efeito da velocidade de varrimento sobre o processamento.

Com o intuito de realizar essa avaliação, realizaram-se novos testes para o duro-alumínio mantendo todos os parâmetros constantes na Tabela 5.8 mas baixando a velocidade de varrimento para os 200mm/s. Tal como nos testes anteriores, são agora avaliadas a taxa de remoção de material e a rugosidade em função da variação da frequência de impulso, da potência do laser e para as velocidades de varrimento de 200mm/s e 300mm/s.

A relação entre a variação da velocidade de varrimento e da frequência de impulso permite definir um parâmetro que caracterize a sobreposição de feixes laser individuais consecutivos. Este parâmetro, designado como *Sobreposição* é dado pela seguinte equação:

$$\text{Sobreposição} = \left[1 - \frac{V_g}{F_q \times D} \right] \times 100 \quad (5.1)$$

em que V_g é a velocidade de varrimento, F_q é a frequência do impulso laser e D é o diâmetro do feixe laser.

Os valores para a sobreposição percentual, tendo em conta os parâmetros frequência de impulso e velocidade de varrimento utilizados para o duro-alumínio, são mostrados na Figura 5.21.

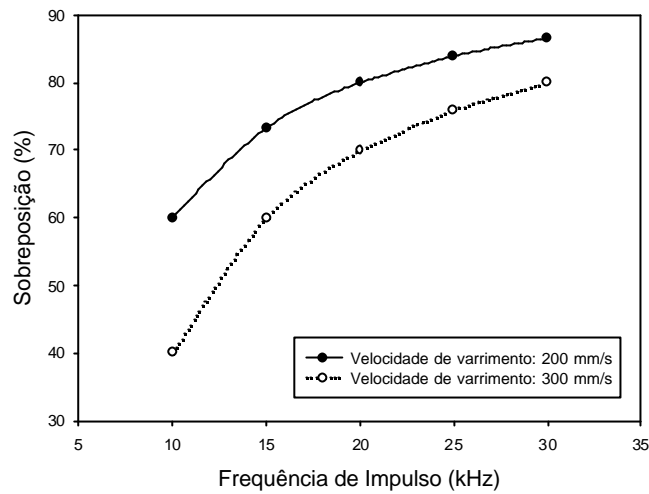


Figura 5.21 – Gráfico da sobreposição do feixe laser em função da frequência de impulso e da velocidade de varrimento, para um feixe de diâmetro de 50µm

Os resultados obtidos para a rugosidade e taxa de remoção de material em função da variação da frequência de impulso, para as duas velocidades de varrimento impostas são mostrados na Figura 5.22.

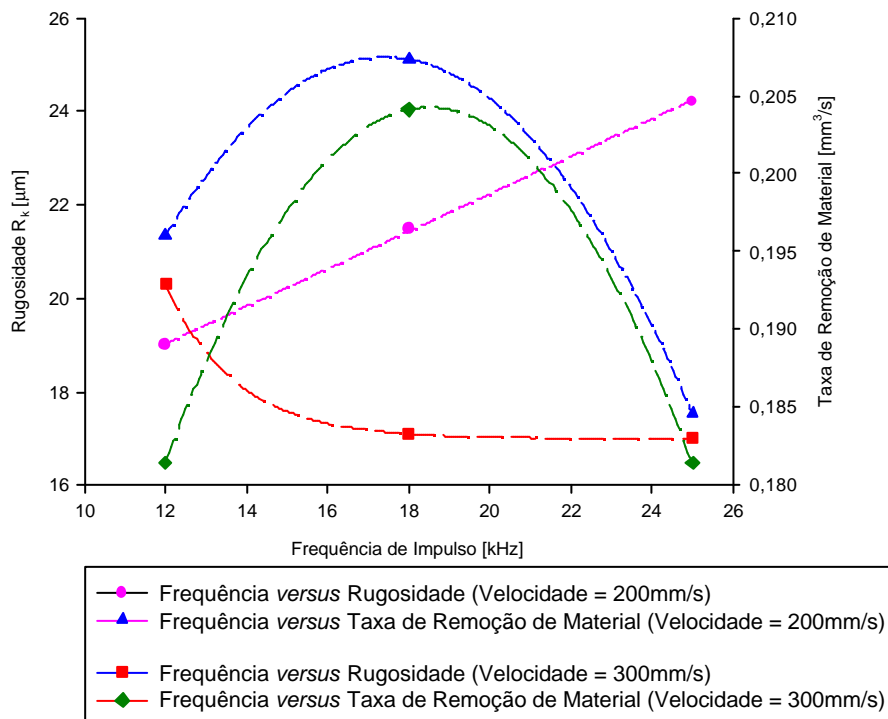


Figura 5.22 – Gráfico comparativo entre a taxa de remoção de material e a rugosidade em função da frequência de impulso no processamento de duroalumínio a 200mm/s e a 300mm/s



Os resultados obtidos para a variação da potência do laser, para as duas velocidades de varrimento impostas são mostrados na Figura 5.23.

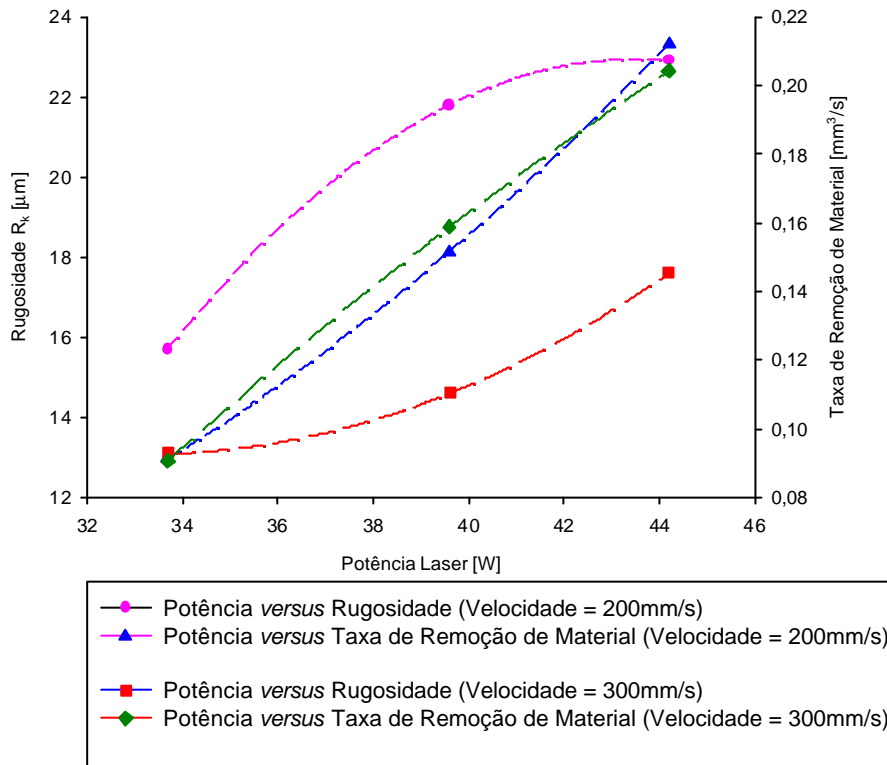


Figura 5.23 – Gráfico comparativo entre a taxa de remoção de material e a rugosidade em função da potência do laser no processamento de duroalumínio a 200mm/s e a 300mm/s

Em ambas as Figuras 5.22 e 5.23, o comportamento da taxa de remoção de material é consistente mesmo variando a velocidade de varrimento, a frequência de impulso e a potência. Estes parâmetros possuem influências análogas às verificadas anteriormente.

A Figura 5.22 mostra que a taxa de remoção de material aumenta para valores de frequência até aos 18kHz, valor de frequência a partir da qual a remoção de material no duro-alumínio decresce. Analisando a Figura 5.21, conclui-se que para valores de frequência superiores a 16kHz, a sobreposição percentual tende a aproximar-se para ambas as velocidades de varrimento com o aumento da frequência, justificando o comportamento similar das curvas de remoção de material na Figura 5.22 após os valores máximos nelas verificados.



A rugosidade mostra um comportamento diverso para ambas as velocidades de varrimento. O decréscimo inicial da rugosidade obtida a 300mm/s é acentuado e verifica-se até aos 16kHz, o que corresponde a uma sobreposição percentual de 62%. É igualmente notório que a esta velocidade, o aumento da frequência não influencia significativamente a rugosidade. Para a velocidade de 200mm/s, a rugosidade mostra um comportamento diferente, a sobreposição percentual assume um valor de 75% a uma frequência de 16kHz o que pode explicar o incremento contínuo da rugosidade.

A Figura 5.23 confirma as tendências obtidas anteriormente no que se refere à influência da potência do laser, o aumento desta contribui de forma significativa não somente para o aumento da taxa de remoção de material como também para o aumento da rugosidade.

É notória a diferença de valores de rugosidade obtidos a 200 e a 300mm/s para valores de taxa de remoção de material semelhantes. À velocidade de 200mm/s e para a mesma frequência, a sobreposição percentual assume sempre valores mais elevados que aqueles verificados à velocidade de 300mm/s.



5.3. Micro-maquinação das impressões

A análise experimental efectuada permitiu determinar os parâmetros óptimos utilizados na obtenção das impressões para o molde de testes. Os valores utilizados são apresentados na Tabela 5.9. Na Figura 5.24 apresentam-se as impressões obtidas por *Laser Milling*.

Tabela 5.9 – Parâmetros utilizados para as impressões.

Material	Velocidade V_g	Distância d	Frequência F_q	Corrente L_s	Potência P
Duro-alumínio	300 mm/s	0,02 mm	25 kHz	27 A	34 W

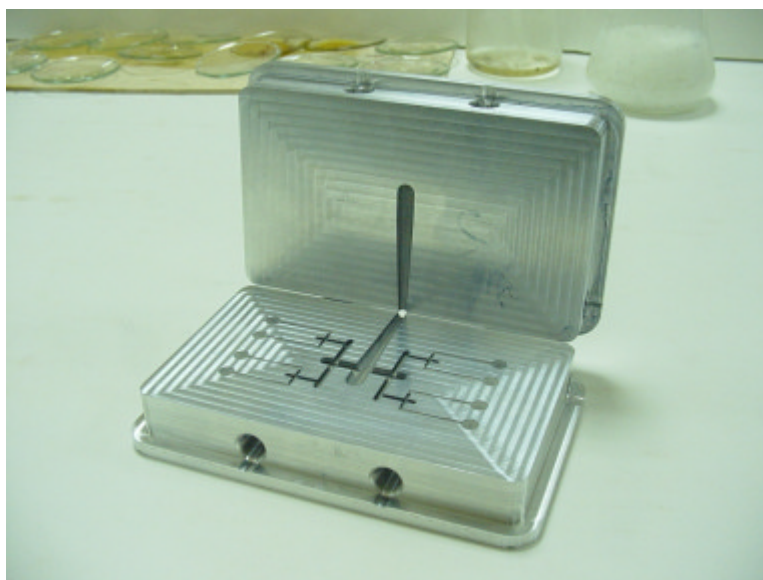


Figura 5.24 – Impressões em duroaluminio obtidas por *Laser Milling*



5.4. Áreas Termicamente Afectadas

O processo de *Laser Milling* produz, tal como já foi documentado no Capítulo 2, provoca elevações de temperatura consideráveis no material processado. Dessa forma, torna-se relevante avaliar a dimensão e magnitude das áreas termicamente afectadas.

5.4.1. Análise Termográfica

Com o intuito de avaliar as áreas termicamente afectadas, foi realizada uma análise termográfica do processamento por *Laser Milling*, tendo sido para este efeito utilizado uma câmara termográfica ThermoCAM PM575 (Figuras 5.25 e 5.26)



Figura 5.25 – Câmara termográfica ThermoCAM PM575



Figura 5.26 – Montagem da câmara termográfica

As análises termográficas foram realizadas durante os testes de remoção de material de forma a analisar as áreas termicamente afectadas nos diversos materiais testados.

Conforme é possível constatar nas Figuras 5.27 a 5.32, as temperaturas máximas detectadas pela câmara termográfica não são representativas da temperatura realmente necessária para



fundir e vaporizar o material, o que indicará certamente que a termografia não é o método mais adequado para medir as áreas termicamente afectadas no processo *Laser Milling*.

Contudo, a condutibilidade térmica dos materiais faz-se notar com alguma evidência, nomeadamente nos materiais mais condutores, duro-alumínio e cobre electrolítico. A dissipação de calor é mais rápida nestes materiais do que no aço temperado, onde a termografia consegue detectar temperaturas pouco acima dos 100°C, ao contrário do que acontece nos restantes materiais.

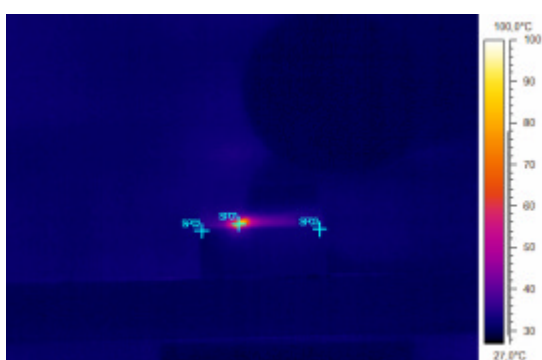


Figura 5.27 – Termografia: Laser Milling em Aço ST001

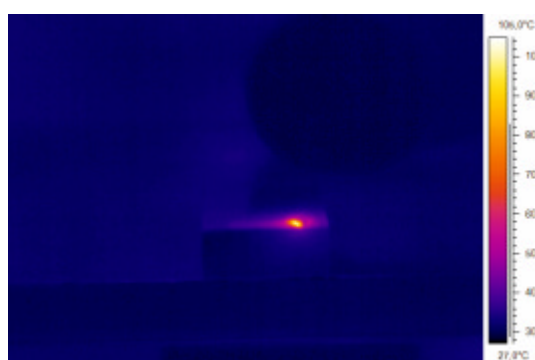


Figura 5.28 – Termografia: Laser Milling em Aço ST002

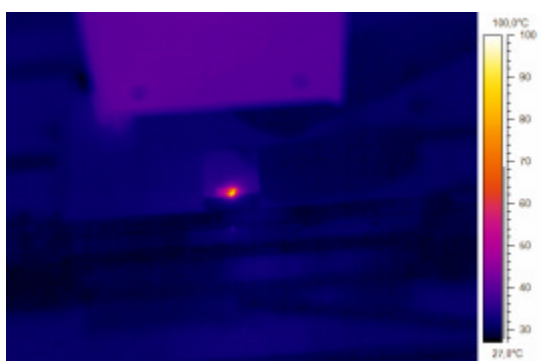


Figura 5.29 – Termografia: Laser Milling em Aço ST003

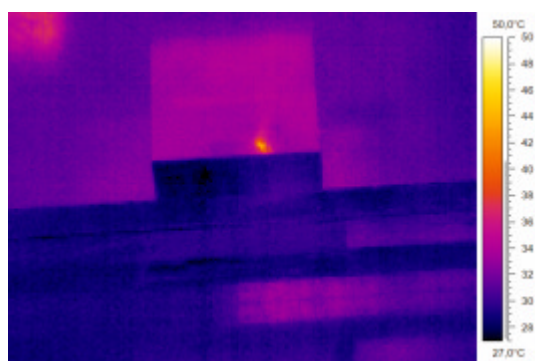


Figura 5.30 – Termografia: Laser Milling em Duro-Alumínio AL001

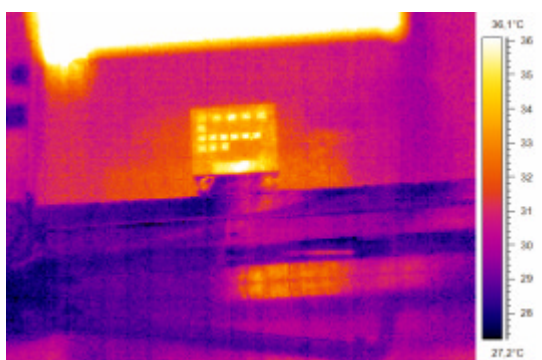


Figura 5.31 – Termografia: Laser Milling em Cobre Electrolítico CE001

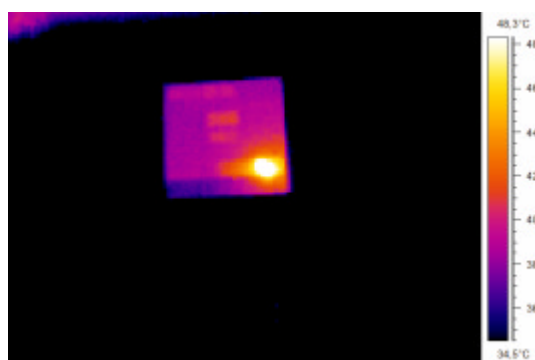


Figura 5.32 – Termografia: Laser Milling em Grafite grão fino GF001



5.4.2. Análise Térmica no software Ansys

Dado o insucesso relativo das análises termográficas e dada a importância que a avaliação das áreas termicamente afectadas representa no processo *Laser Milling*, procedeu-se ao estabelecimento de um processo de simulação recorrendo ao software Ansys.

Mecanismo de interacção do feixe laser com o material

A penetração do feixe laser é condicionada pelo tipo de material no qual incide [2]. Os fótons incidentes de um mesmo feixe, logo com a mesma energia, penetrarão o material embora nem todos consigam atingir a mesma profundidade. Alguns desses fótons colidirão com átomos e perderão alguma da sua energia inicial antes de outros fótons, que poderão atingir profundidades superiores. Surge deste facto a enorme relevância que a densidade do material possui na quantidade de energia perdida por um feixe laser a incidir na sua superfície.

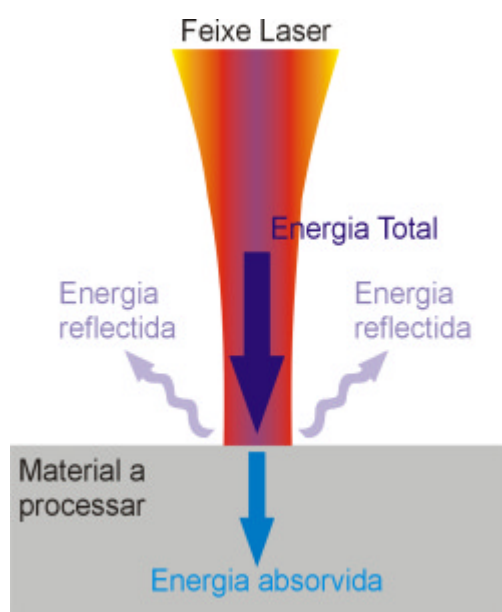


Figura 5.33 – Mecanismo de reflexão de energia na superfície do material processado pelo feixe laser.

Quanto maior for a densidade do material, maior será a ocorrência de colisões entre fótons e átomos, causando maiores perdas de energia e logo, menor eficácia na penetração do feixe. Outra característica importante a considerar é o estado da superfície do material onde o feixe laser incide. Um bom acabamento superficial do material aumente a sua reflectividade, ou seja, a radiação incidente dividir-se-á entre radiação absorvida e radiação reflectida (Figura 5.33).



Para uma técnica de processamento por laser como é o caso do *Laser Milling*, somente a radiação absorvida pelo material é útil, tendo esta que ser devidamente contabilizada para o cálculo do fluxo de calor a aplicar para cada um dos materiais em estudo na simulação do varrimento laser.

A interacção entre o laser e a matéria pode ser assim descrito através de um balanço energético entre a energia incidente e a energia absorvida, uma vez contabilizadas as perdas por reflexão.

Para a realização da simulação computacional foi necessário estimar previamente parâmetros como: densidade de potência de laser aplicada e o fluxo de calor gerado.

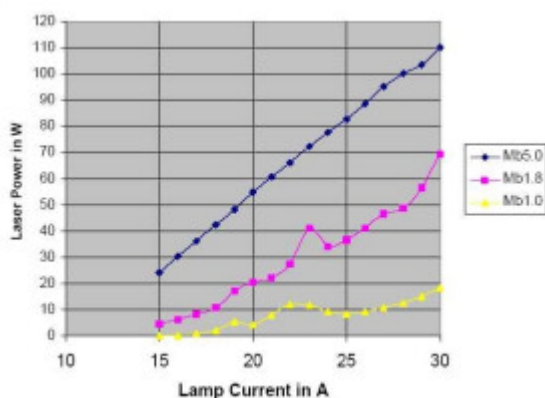


Figura 5.34 – Dados experimentais fornecidos pela Foba GmbH relativos à relação entre a corrente de lâmpada e a potência do laser

A Figura 5.34 mostra os valores de potência medidos, com base em dados experimentais cedidos pela Foba GmbH para o modelo G900, para diversos valores de corrente de lâmpada. Tomando como referência estes valores, foi realizada uma regressão linear com o intuito de obter valores de potência laser para um Q-Switch de 1,5mm a operar com uma corrente de lâmpada de 28A.

Conforme é possível constatar na Figura 5.34, a relação entre as duas grandezas só aparenta ser linear para o Q-Switch de 5,0mm, para o qual se verifica a potência máxima de operação de 110W para uma corrente de lâmpada de 30A.

Para os restantes valores de Q-Switch representados, a tendência é similar. Contudo, o aumento da potência não é constante à medida que se incrementa a corrente de lâmpada. Tal dever-se-á às características dos componentes ópticos do laser pelo que, tais valores de potência só poderiam ser obtidos experimentalmente.



A obtenção dos valores de potência para o Q-Switch de 1,5mm foi realizada por interpolação e regressão linear a partir das duas curvas obtidas para os valores de 1,0mm e 1,8mm. A curva relativa à potência do laser para o Q-Switch de 5,0mm não foi considerada necessária na interpolação, uma vez que a tendência de todas as curvas já havia sido previamente confirmada. Conforme se pode constatar na Figura 5.35, para uma corrente de lâmpada de 28A e um Q-Switch de 1,5m, a potência do laser esperada é de aproximadamente 37W. Com base neste valor de potência, pode ser calculado o valor do fluxo de calor a aplicar na simulação do varrimento do feixe laser sobre o material.

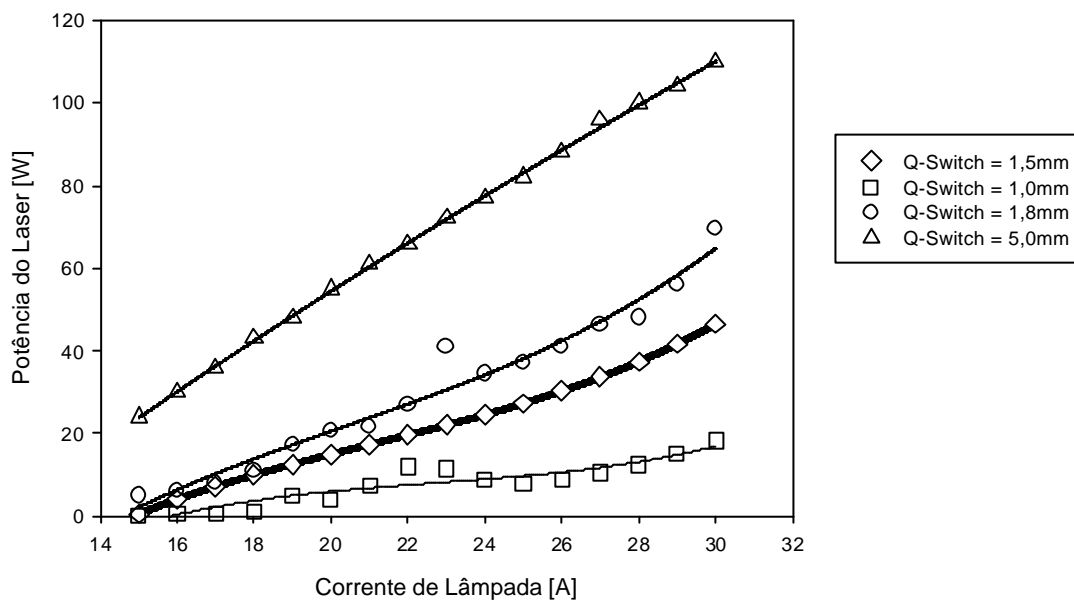


Figura 5.35 – Regressão linear para um Q-Switch de 1,5mm obtida a partir da interpolação dos coeficientes calculados para a regressão das curvas de potência do laser para valores de Q-Switch de 1,0 e 1,8mm, respectivamente.

Simulação Numérica

A incidência do feixe laser sobre o material e os seus efeitos sobre este podem ser considerados unidimensionais uma vez que fenómenos como a convecção ou a condução lateral de calor não são neste caso relevantes [3].

Assim, a simulação do varrimento laser sobre a superfície foi modelada como um problema bidimensional em que há a aplicação de um fluxo de calor sobre elementos da malha gerada de



forma a simular um varrimento com um comprimento de 25mm e uma velocidade de 200mm/s. O tempo de aplicação do fluxo de calor, $t_{\text{fluxo calor}}$, sobre cada elemento da malha depende assim directamente da dimensão do elemento e é dado por:

$$t_{\text{fluxo calor}} = \frac{d_{\text{malha}}}{V_{\text{varrimento}}} \quad (5.2)$$

em que δ_{malha} é o tamanho do elemento da malha e $V_{\text{varrimento}}$ é a velocidade de varrimento.

Os valores utilizados no Ansys para caracterizar os materiais em estudo na simulação estão descritos na Tabela 5.10:

Tabela 5.10 – Propriedades utilizadas dos materiais em análise na simulação de varrimento laser

	Densidade ρ [kg/m ³]	Condutibilidade Térmica K [W/m K]	Calor Específico C _p [J/kg K]
Aço Temperado	7850	47	460
Duro-Alumínio	2800	130	960

Para além destas características, existem propriedades ópticas que também desempenham um papel importante nesta análise e que devem ser consideradas. A reflectividade é a característica óptica complementar de outra normalmente utilizada para o cálculo da profundidade de penetração do feixe laser no material, designada por emissividade e dada por:

$$R = 1 - \epsilon \Leftrightarrow \epsilon = 1 - R \quad (5.3)$$

onde R é a reflectividade do material e ϵ a sua emissividade.



A difusividade térmica é a medida da rapidez com que um material pode mudar a sua temperatura [4] sendo determinada através da seguinte equação:

$$D = \frac{K}{C_p \times \rho} \quad (5.4)$$

em que K é a condutibilidade térmica do material, C_p o seu calor específico e ρ a respectiva densidade.

Qualquer uma destas grandezas é dependente da temperatura. Na Tabela 5.11 figuram os valores da reflectividade e emissividade para materiais comparáveis aos que estão em análise.

Tabela 5.11 – Propriedades ópticas de materiais comparáveis aos que estão em análise na simulação de varrimento laser [5]

	Reflectividade	Emissividade
Aço (538°C)	0.86	0.14
Alumínio (100°C)	0.82	0.18

Os valores constantes na Tabela 5.11 foram utilizados na simulação numérica como dados indicativos, dada a dificuldade de medir a reflectividade e emissividade efectivas dos materiais processados. Estas grandezas, à semelhança do sucedido nas propriedades térmicas, variam com a temperatura, isto é, a temperaturas mais elevadas, a emissividade do material aumenta.

O valor do fluxo de calor aplicado na simulação foi calculado a partir de:

$$F_{\text{útil}} = F \times e = \frac{P}{\rho \times r_{\text{feixe}}^2} \times e, \quad (5.5)$$

em que F é a densidade de energia por unidade de área, e é a emissividade do material, P a potência do laser e r é o raio do feixe laser.



Da aplicação da Equação 5.4 resultam então os valores do fluxo de calor a aplicar na simulação para ambos os materiais em função do valor de potência do laser obtido anteriormente, mostrados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Parâmetros utilizados na simulação numérica

	Potência Laser [W]	Velocidade de Varrimento [mm/s]	Fluxo de Calor [MW/cm ²]
Aço Temperado	37	200	0,2638
Duro-Alumínio	37	300	0,3392

Para as simulações de ambos os materiais foi modelada uma placa com dimensão suficiente para realizar um varrimento com 5mm de comprimento. Sobre esta placa, foi gerada uma malha de elementos finitos com a dimensão inicial de 0,05mm. Por se tratar de uma análise transiente, a simulação do varrimento do feixe laser sobre o material foi realizada através de um ciclo de repetição, onde para cada um dos elementos seleccionados, o fluxo de calor é aplicado durante o tempo correspondente à velocidade de varrimento adoptada. Após esse tempo, o fluxo de calor é apagado, dá-se o incremento no número do elemento e um novo fluxo de calor é aplicado no elemento seguinte. Este procedimento é realizado até que o número de elementos total corresponda aos 5mm de extensão previstos para o varrimento.

As simulações numéricas do varrimento laser foram realizadas no software comercial Ansys. O tipo de elemento utilizado foi o PLANE77. Trata-se de um elemento bidimensional, para análises térmicas com oito nós, um em cada vértice e um também em cada ponto médio de cada aresta do elemento. O Anexo 3 contém as listagens dos *input files* utilizados no software Ansys.

Os resultados obtidos para a simulação numérica do varrimento laser sobre o aço temperado são mostrados nas Figuras 5.36 e 5.37.

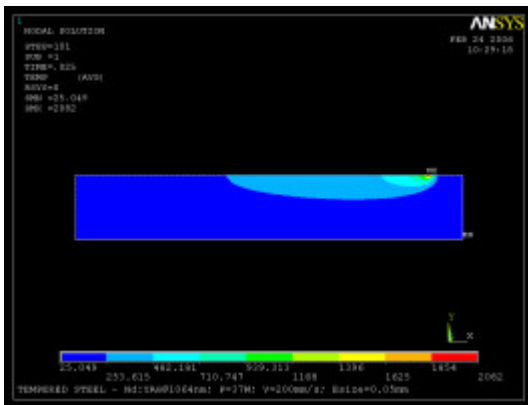


Figura 5.36 – Simulação numérica do varrimento laser a 200mm/s sobre aço temperado

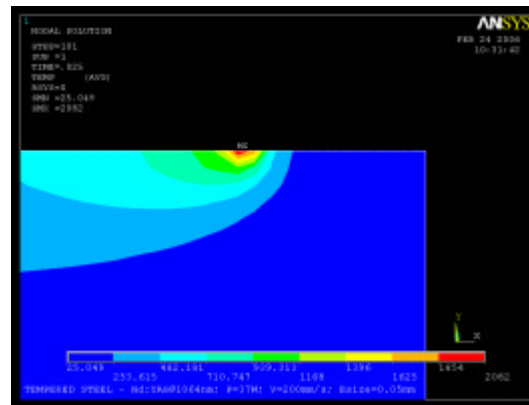


Figura 5.37 – Detalhe da zona final do varrimento onde se verifica a temperatura máxima, T=2082°C

Pela análise da Figura 5.37, é possível constatar que a 0,1mm de profundidade se verificam ainda temperaturas superiores a 700°C, temperaturas essas susceptíveis de provocar alterações estruturais no aço. A temperatura máxima verificada é de 2082°C, valor este concordante com a temperatura necessária para vaporizar o fundido decorrente da aplicação do fluxo de calor.

Para o duro-alumínio foi realizada igualmente uma simulação numérica semelhante, com a mesma dimensão de malha, os resultados são mostrados nas Figuras 5.38 e 5.39.

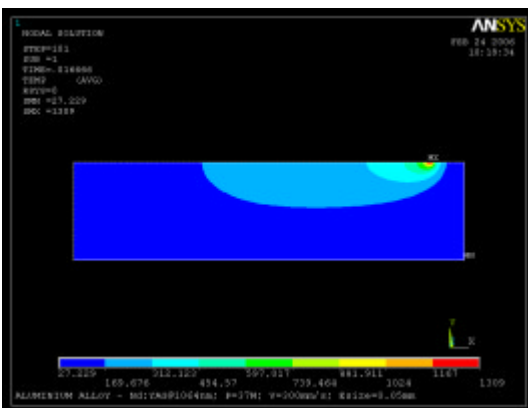


Figura 5.38 – Simulação numérica do varrimento laser a 300mm/s sobre duro-alumínio

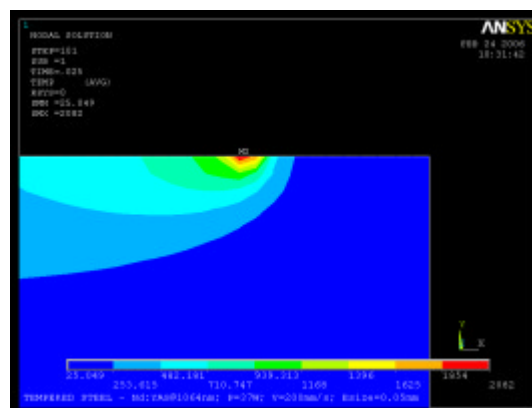


Figura 5.39 – Detalhe da zona final do varrimento onde se verifica a temperatura máxima, T=1309°C

A maior emissividade e difusividade térmica do alumínio desempenham aqui um papel importante, a temperatura máxima verificada neste material é bastante inferior à verificada no varrimento em aço para a mesma potência do laser. Consequentemente, a profundidade das áreas termicamente afectadas é necessariamente inferior.



5.5. Referências

[1] Gupta, Mool, C.; Ferroelectric Materials; Handbook of Photonics; 87:124; CRC Press; 1996

[2] NDT Resource Center; Depth of penetration of radiation energy; acedido em 12-12-2005 em <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/HighSchool/Radiography/penetrationdepth.htm>

[3] Schäfer, C.; Urbassek, H. M.; Metal ablation by picosecond laser pulses: A hybrid simulation; *Physical Review B* 66, 115404; 2002

[4] Chapman, L. A.; Fry, A. T.; Roberts, S. J.; Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity Measurements on Oxide Scales; NPL Report DEPC-MPE 018; 2005

[5] Omega Engineering International Inc.; Emissivity of common materials; acedido em 24-2-2006 em www.omega.com/literature/transactions/volume1/emissivitya.htm



6. Resultados Experimentais – Micro-Injecção

6.1. Montagem dos equipamentos utilizados

A montagem do molde e respectivos equipamentos acessórios foi realizada de acordo com o delineado na fase de projecto descrita no Capítulo 4. Assim, a unidade de co-injecção Plasdan EL27 foi acoplada rigidamente ao molde sendo este conjunto posteriormente montado na unidade de injecção D80, conforme se indica na Figura 6.1.



Figura 6.1 – Montagem do molde e unidade de co-injecção na unidade de injecção D80

A montagem do molde e dos respectivos equipamentos acessórios foi realizada de modo a que a cablagem de controlo e de potência assim como a tubagem de refrigeração fossem montadas de uma forma coerente tendo em consideração a posição do operador e da necessidade de acesso ao plano de junta para remover a moldação.

Foram tidas as necessárias precauções de segurança na operação de ambos os equipamentos sem prejuízo do carácter experimental dos testes.

Na Figura 6.2 é mostrada a vista do lado do operador, onde se pode ver parte da instrumentação para a aquisição de sinal de pressão e temperatura na cavidade. Para baixo, é possível ver as conexões rápidas da refrigeração.

Na Figura 6.3 é mostrado o lado oposto ao operador. Aqui são visíveis as cablagens de potência para as resistências do molde assim como os cabos dos termopares para o controlo da temperatura das resistências.

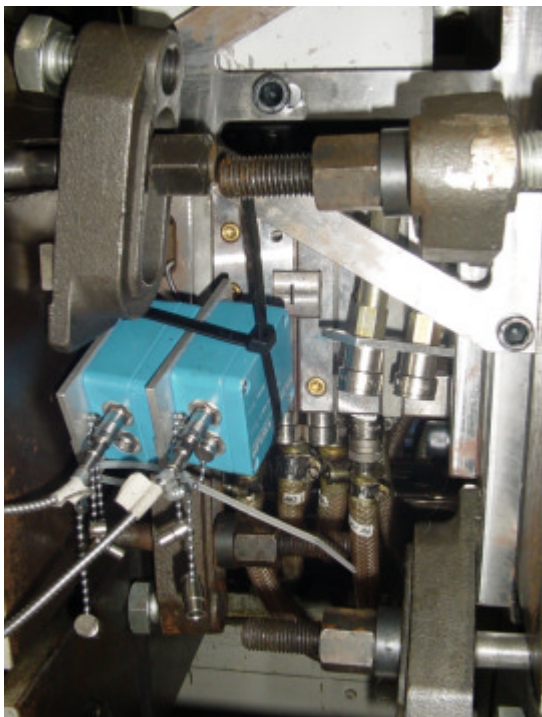


Figura 6.2 – Vista do molde montado do lado do operador

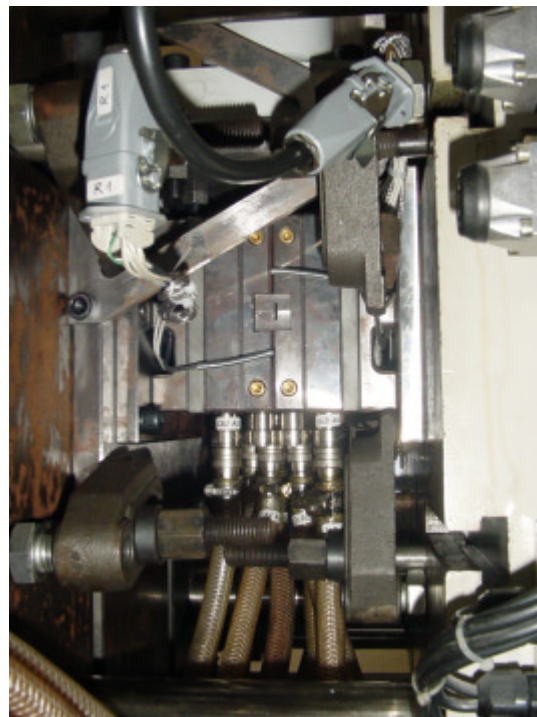


Figura 6.3 – Vista do molde montado do lado oposto ao operador

Do lado do operador ficaram localizadas a aquisição de sinal (Figura 6.4) e a unidade de controlo da unidade de co-injecção Plasdan EL27 (Figura 6.5). A unidade de controlo de temperatura das resistências ficou localizada no lado oposto ao operador (Figura 6.6).



Figura 6.4 – Instrumentação de aquisição de dados de pressão e temperatura Kistler



Figura 6.5 – Unidade de controlo da unidade de co-injecção Plasdan EL27



Figura 6.6 – Unidade de controlo de temperatura das resistências do molde



6.2. Testes de Injecção

O início dos testes foi marcado pela afinação da quantidade de material a injectar. O doseamento de material nestas circunstâncias desempenha um papel importante e dado que o equipamento utilizado não possui um elevado rigor no doseamento, esta tarefa teve de ser realizada por várias iterações até que pelo menos o material chegasse a todas as cavidades e as preenchesse totalmente. Alguns exemplos destes testes preliminares são ilustrados nas Figuras 6.7 a 6.9.



Figura 6.7 – Injecção inicial com excesso de material



Figura 6.8 – Injecção posterior com insuficiência de material



Figura 6.9 – Injecção com insuficiência de material

Realizados os testes iniciais e sendo obtidas as condições de processamento apropriadas, foi iniciada uma sequência de testes variando os parâmetros de processamento.



6.2.1. Parâmetros de Injecção

Em seguida foram realizados vários testes de injecção variando alguns parâmetros para verificar o desempenho do processo.

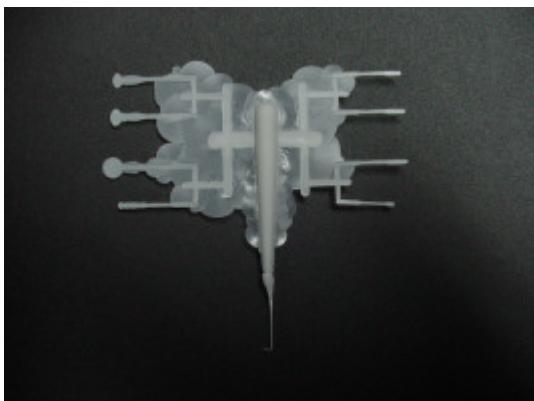


Figura 6.10 – Moldação 1

Parâmetros de Injecção utilizados na Moldação 1 (Figura 6.10):

- Temperatura das Cavidades: 30°C
- Temperatura de Injecção: 200°C
- Velocidade de Injecção: 50mm/s
- Tempo de Injecção: 1s
- Pressão de Injecção: 100MPa

Os resultados obtidos (Figura 6.10) mostram uma solidificação prematura do fundido, não havendo o preenchimento total das cavidades. Por força de uma pressão de injecção excessiva, verifica-se a formação de rebarba junto ao corpo principal do canal de alimentação. O tempo de injecção poderá ter sido demasiado curto, dada a formação de chupados no próprio canal de alimentação.

Procedeu-se em seguida à realização de uma segunda moldação, tendo-se para tal variado os valores de temperatura das cavidades e a pressão de injecção.

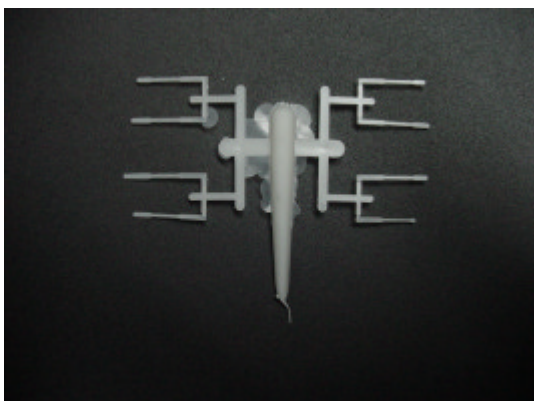


Figura 6.11 – Moldação 2

Parâmetros de Injecção utilizados na Moldação 2 (Figura 6.11):

- Temperatura das Cavidades: 50°C
- Temperatura de Injecção: 200°C
- Velocidade de Injecção: 50mm/s
- Tempo de Injecção: 1s
- Pressão de Injecção: 80MPa



Os problemas notados na moldação anterior fazem-se sentir novamente na Moldação 2. Contudo, nota-se uma melhoria relativa da qualidade da moldação e um maior equilíbrio no enchimento com um aumento da temperatura do molde, apesar do decréscimo da pressão de injecção.

De modo a estudar-se o efeito do aumento simultâneo na temperatura nas cavidades e na temperatura de injecção, procedeu-se a uma terceira moldação.



Figura 6.12 – Moldação 3

Parâmetros de Injecção utilizados na Moldação 3 (Figura 6.12):

- Temperatura das Cavidades: 85°C
- Temperatura de Injecção: 270°C
- Velocidade de Injecção: 50mm/s
- Tempo de Injecção: 1s
- Pressão de Injecção: 50MPa

Com este conjunto de parâmetros, constata-se o quase total enchimento das cavidades, não obstante o balanceamento natural realizado e isto apesar de algumas cavidades apresentarem a formação de rebarba.

Com o objectivo de melhorar o enchimento das cavidades, foi aumentada a temperatura das cavidades relativamente à moldação anterior e diminuído o tempo de injecção para 0,8 segundos, possibilitando um aumento da velocidade de injecção para fazer face às dificuldades de enchimento dos provetes.

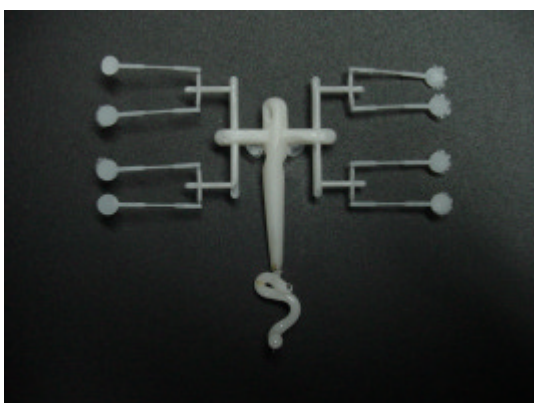


Figura 6.13 – Moldação 4

Parâmetros de Injecção utilizados na Moldação 4 (Figura 6.13):

- Temperatura das Cavidades: 90°C
- Temperatura de Injecção: 270°C
- Velocidade de Injecção: 50mm/s
- Tempo de Injecção: 0,8s
- Pressão de Injecção: 55MPa

O equilíbrio no enchimento começa a ser atingido com os parâmetros utilizados na Moldação 4. No final do canal principal surge um defeito oriundo provavelmente do efeito de jacto provocado pela inexistência de um obstáculo próximo do encosto do bico da unidade de injecção. Notam-se alguns outros defeitos mas localizados essencialmente nos poços frios. Nalgumas das moldações poder-se-á notar com mais evidência um defeito no corpo do canal principal de alimentação mas que se deve à extracção manual da moldação.

Na Moldação 5 foi apenas realizada uma pequena redução da temperatura de injecção que, como se pode ver na Figura 6.14, não motiva grandes diferenças relativamente à moldação anterior.

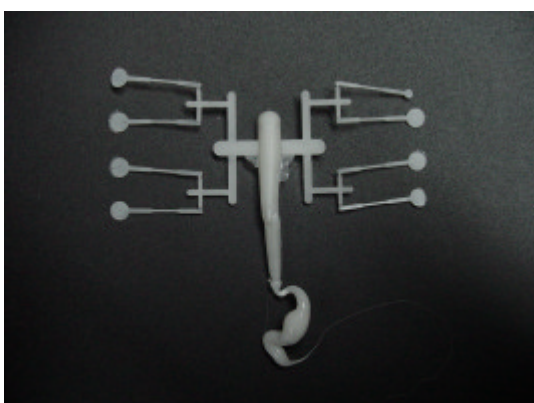


Figura 6.14 – Moldação 5

Parâmetros de Injecção utilizados na Moldação 5 (Figura 6.14):

- Temperatura das Cavidades: 90°C
- Temperatura de Injecção: 260°C
- Velocidade de Injecção: 50mm/s
- Tempo de Injecção: 0,8s
- Pressão de Injecção: 55MPa

Relativamente à moldação anterior, procedeu-se numa sexta moldação a um aumento da pressão de injecção de modo a obter-se o enchimento total. A tendência para estabilizar a qualidade da moldação continua a verificar-se. Contudo, continua a não se verificar o



enchimento total das cavidades. No entanto verifica-se agora a inexistência de rebarba nos provetes.

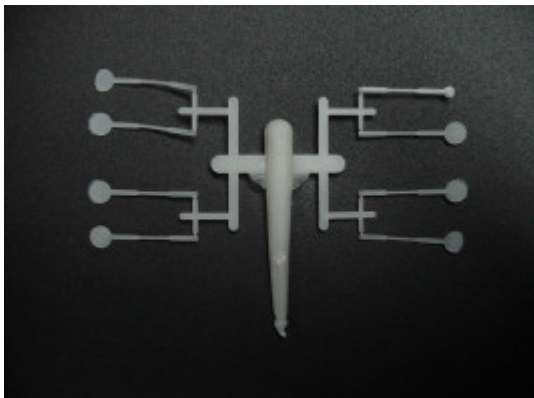


Figura 6.15 – Moldação 6

Parâmetros de Injecção utilizados na Moldação 6 (Figura 6.15):

- Temperatura das Cavidades: 90°C
- Temperatura de Injecção: 270°C
- Velocidade de Injecção: 50mm/s
- Tempo de Injecção: 0,8s
- Pressão de Injecção: 60MPa

Os resultados anteriormente apresentados mostram que, relativamente aos parâmetros indicados na bibliografia e utilizados na Moldação 1, o aumento da qualidade das moldações passa por um aumento significativo da temperatura das cavidades e de injecção (o diferencial deve ser menor que o utilizado em injecção convencional).



6.2.2. Provetes

Os provetes obtidos, fruto das moldações anteriores (Figura 6.16) após a estabilização dos parâmetros de injecção, foram separados dos canais de alimentação e pesados numa balança digital (Figura 6.17) de modo a aferir o seu estado de compactação.

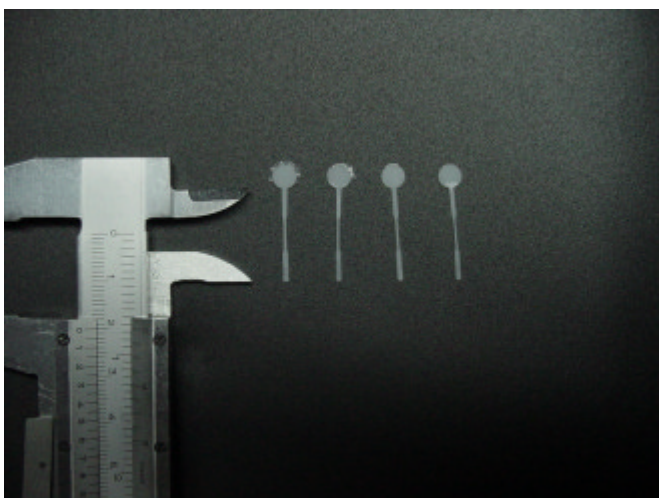


Figura 6.16 – Imagem de alguns provetes destacados dos canais de alimentação



Figura 6.17 – Balança digital



Figura 6.18 – Amostras da Moldação 6

Para avaliação da compactação foram seleccionadas 14 amostras da Moldação 6 (Figura 6.18).

Os respectivos pesos são apresentados na Tabela 6.1.



Tabela 6.1 – Pesos das amostras obtidas na Moldação 6

Amostras	Peso	Média	Desvio
1	14,1 mg		6,76%
2	12,3 mg		-6,87%
3	14,0 mg		6,00%
4	12,5 mg		-5,35%
5	13,3 mg		0,70%
6	12,6 mg		-4,60%
7	12,4 mg	13,2 mg	-6,11%
8	11,8 mg		-10,65%
9	11,8 mg		-10,65%
10	14,8 mg		12,06%
11	15,1 mg		14,33%
12	12,9 mg		-2,33%
13	15,0 mg		13,57%
14	12,3 mg		-6,87%



7. Conclusões e trabalhos futuros

A micro-fabricação é actualmente um domínio de grande actividade em termos de investigação e aplicação industrial. A este nível assume particular destaque a tecnologia Laser Milling que constitui o tema central desta dissertação através do estudo da influência dos parâmetros de processamento sobre taxas de remoção de material e acabamento superficial, obtenção de cavidades moldantes e realização de testes de injecção para validar opções de projecto do molde.

A importância que a micro-fabricação e as nano-tecnologias representam actualmente é descrita de forma sucinta no Capítulo 1. No Capítulo 2 descrevem-se detalhadamente todos os processos de micro-fabricação conhecidos até à presente data, capazes de contribuir de alguma forma para a produção de micro-cavidades. O estado da arte actual dos processos de micro-fabricação é bastante rico em técnicas, algumas delas já disponíveis em termos comerciais o que as torna apetecíveis para uso industrial. Alguns destes processos, dada a sua especificidade, poderão nunca passar de um desenvolvimento meramente académico. Contudo, o seu mérito técnico não poderia deixar de ser tido em conta.

O estado da arte dos processos de micro-fabricação demonstra que muitos dos processos apresentados possuem ainda um grande espaço para evolução, tanto ao nível das técnicas como ao nível dos materiais processados. A evolução ao nível dos materiais pode ainda vir a conseguir um ascendente dos processos aditivos sobre os processos subtractivos.

A micro-fabricação demonstra capacidades importantes no contexto da micro-injecção, nomeadamente aqueles processos designados como directos, logo com menos etapas intermédias até à obtenção das cavidades. Os processos LIGA surgem classificados como directos porque todo o processo em si pressupõe todas as etapas até à obtenção de uma cavidade metálica, capaz de ser utilizada por um qualquer processo de produção em série.

A selecção do processo *Laser Milling* para a realização das zonas moldantes foi fortemente condicionada pela proximidade e, essencialmente, pela disponibilidade demonstrada pela HASCO Portuguesa sediada na Marinha Grande. Todavia, utilizando a metodologia de selecção



proposta no Capítulo 2, constata-se que este processo estaria dentro do grupo dos processos seleccionáveis para a aplicação e que a razão de aspecto conseguida pelo *Laser Milling* seria também mais do que suficiente.

Esta tecnologia está a despertar muito interesse na indústria de moldes nacional. Contudo, a sua aplicabilidade está ainda limitada pela razão de aspecto e pela capacidade de conseguir obter cavidades passíveis de serem utilizadas como zonas moldantes. A verticalidade das paredes laterais começou por ser uma limitação. Todavia, apesar de já ser ultrapassada mantém-se a questão da rugosidade nessas paredes que, sendo elevada, pode inviabilizar a utilização na micro-injecção.

A evolução da tecnologia *Laser Milling*, apresentada de forma detalhada no Capítulo 3, demonstra que têm sido dados passos decisivos que permitirão a generalização da aplicação deste processo na indústria de moldes de precisão. Actualmente, o investimento neste processo e a sua utilização deverão ser feitos de forma ponderada e tendo em conta as suas reais capacidades actuais.

Para se testar a aplicação da tecnologia ao sector dos moldes, procedeu-se ao projecto de um molde tal como se descreve no Capítulo 4. Este projecto foi condicionado por diversas limitações, a maior das quais foi a indisponibilidade de um equipamento de injecção dedicado à micro-injecção. O equipamento utilizado, apesar de não ser vocacionado para a micro-injecção possui ainda assim características relevantes como a capacidade mínima de injecção. Pelo facto de não se tratar de um molde dedicado à produção em massa, não foi privilegiada a automatização do seu funcionamento, sendo simplificados alguns dos seus sistemas funcionais.

No que se refere a resultados obtidos, os testes de *Laser Milling* foram bastante reveladores quanto ao compromisso acabamento/remoção de material tal como se indica no Capítulo 5. À semelhança de outros processos subtractivos, este compromisso fará a diferença entre a produtividade e a não-conformidade, pelo que a importância da selecção de parâmetros operatórios para o processo é crucial.

A avaliação da rugosidade é de extrema importância, tendo em conta que se trata da produção de cavidades para o processo de micro-injecção. Apesar da baixa razão de aspecto da moldação, uma rugosidade demasiado elevada poderia inviabilizar a utilização do processo o que não se



verificou. O processo apresenta valores de rugosidade perfeitamente aceitáveis nas faces horizontais, em faces inclinadas e verticais a qualidade superficial diminui claramente devido essencialmente à técnica de remoção de material por camadas.

Os testes de injecção, descritos no Capítulo 6, foram igualmente reveladores das vicissitudes inerentes à injecção de quantidades tão pequenas de material em cavidades de reduzida dimensão. A avaliação feita previamente no Capítulo 4 através da utilização do software MoldFlow permitiu antever o enchimento total das cavidades. Todavia, veio a verificar-se que a pressão de injecção não necessitava ser tão elevada quanto previsto na simulação de enchimento.

A razão de aspecto dos componentes é reduzida, contudo, existiam ainda algumas dificuldades inerentes à baixa espessuras dos provetes. A zona de ensaio do provete possui uma secção $0,01\text{mm}^2$ o que criou um desafio adicional para o processo de injecção. Esta redução de espessura diminui também drasticamente o comprimento de fluxo do polímero injectado e foi nesse aspecto que o sistema de controlo de temperatura do molde provou ser mais eficaz.

A estabilização dos parâmetros permitiu a obtenção de provetes que serão noutra dissertação alvo de análises para caracterização da sua morfologia.

Os resultados apresentados nesta dissertação mostram que:

- o processo Laser Milling é uma tecnologia de remoção de material camada a camada com enorme potencial para a industria de moldes
- a optimização dos parâmetros operatórios podem melhorar significativamente o desempenho desta tecnologia. Estes parâmetros devem ser criteriosamente definidos de acordo com o material a processar, os tempos de fabricação pretendidos e a qualidade superficial desejada
- os resultados obtidos sugerem que o tempo de processamento pode ser reduzido através do aumento do espaçamento entre varrimentos até um valor próximo do diâmetro do feixe laser, sem comprometer a qualidade superficial
- baixas frequências de impulso e baixas potências são condições recomendáveis para a obtenção de superfícies com baixa rugosidade (próximo de 1 Ra)



- o aumento da taxa de remoção de material é conseguido mediante o aumento quer da frequência de impulso até um valor óptimo quer da potência do laser
- o aumento da velocidade de varrimento diminui a remoção de material uma vez que diminui a sobreposição entre feixes laser consecutivos
- à semelhança do que acontece em processos convencionais de corte por arranque de apara, processar materiais mais dúcteis implica a utilização de parâmetros menos exigentes
- a implementação de códigos de simulação adequados permite determinar as zonas termicamente afectadas contribuindo assim para a optimização do processo
- é possível a utilização da tecnologia de *Laser Milling* para a obtenção de cavidades moldantes e dos respectivos canais de alimentação
- testes realizados com as cavidades moldantes obtidas mostram que, relativamente aos parâmetros indicados na bibliografia, o aumento da qualidade das molações passa por um aumento significativo da temperatura das cavidades e de injecção (o diferencial deve ser menor que o utilizado em injecção convencional)

O trabalho desenvolvido abre igualmente oportunidades de novos desenvolvimentos e estudos que deverão ser alvo de investigação futura. A este nível convém destacar:

- utilização de cavidades moldantes com geometrias complexas para avaliação das condições de processamento
- utilização da tecnologia de *Laser Milling* para produzir micro-cavidades destinadas à obtenção de micro-componentes injectados e estabelecimento da relação entre condições de fabricação das cavidades e das condições de injecção
- definição de regras para estabelecimento das estratégias de varrimento optimizadas em função das geometrias a obter. Estas regras deverão ter em consideração aspectos como a taxa de remoção, qualidade superficial e rigor dimensional



Anexo A1 | Lasers Nd:YAG

A1.1. Introdução

A palavra “laser” deriva do acrónimo em inglês *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. No espaço de poucos anos, o laser viu o seu estatuto de equipamento de laboratório rapidamente alterado para equipamento industrial de elevado desempenho, em aplicações de elevado rigor técnico [1].

Em termos industriais, as suas múltiplas aplicações dividem-se pelo processamento de materiais, tratamentos superficiais e ensaios não-destrutivos. Noutros domínios, o laser destaca-se pela sua aplicação na medicina, aplicações militares e em instrumentação comercial [2].

No caso concreto da micro-fabricação por Laser, o processo envolve um fenómeno de sublimação de metais. O feixe laser incide sobre o material, fundindo-o de forma localizada e elevando a sua temperatura até final do impulso do feixe laser, altura em que o material liquefeito se vaporiza e é expelido.

Esta técnica de processamento de metais para a obtenção de componentes técnicos tem sido aplicada recorrendo a diversos tipos de lasers com tempos de impulso desde os microsegundos até aos femtosegundos (10^{-15} s) e com comprimentos de onda que vão desde o infravermelho até ao ultravioleta [3]. Vários trabalhos têm provado a capacidade de obtenção de geometrias complexas numa grande variedade de materiais. Contudo, tal implica um compromisso entre qualidade e a produtividade, compromisso esse em que os lasers Nd:YAG tem revelado algumas vantagens sobre os restantes tipos de lasers.

O laser Nd:YAG permite uma gama variada de aplicações devido às suas características e por ser um dos poucos lasers existentes no mercado que permite a sua operação estimulado por lâmpadas ou por diodos e em modo pulsatório ou contínuo [2].



A1.2. Características do Laser Nd:YAG

A1.2.1. Constituição

Um laser é tipicamente constituído por três elementos essenciais:

- Meio activo: conjunto de átomos, moléculas ou iões capazes de emitir radiação óptica
- Bombeamento: fonte de energia capaz de excitar os constituintes do meio activo
- Cavidade óptica ou ressonante: espelhos nos quais o feixe de radiação emitido é sucessivamente reflectido, forçando-o a passar repetidas vezes pelo meio activo.

O laser Nd:YAG é um laser de estado sólido, constituído por um varão sólido de cristal de YAG (*Yttrium Aluminium Garnet*) infiltrado com iões de Neodímio (Nd^{3+}) numa percentagem de aproximadamente 1%. O processo de estimulação é normalmente realizado recorrendo a lâmpadas de kriptón ou xénon, que constituem a fonte de energia de bombeamento. O conjunto pode compreender várias lâmpadas, podendo estas variar em quantidade e disposição de modo a obter várias potências e qualidades do feixe laser [4].

A1.2.2. Modo de Funcionamento

A Figura A1.1 ilustra o funcionamento de um Laser Nd:YAG. O varão de cristal YAG está montado numa cavidade óptica de formato semi-elíptico onde é estimulado opticamente com fotões pelas duas lâmpadas de flash, elevando a excitação dos iões Nd^{3+} para dois níveis energéticos de bombeamento, produzindo a inversão populacional no varão YAG.

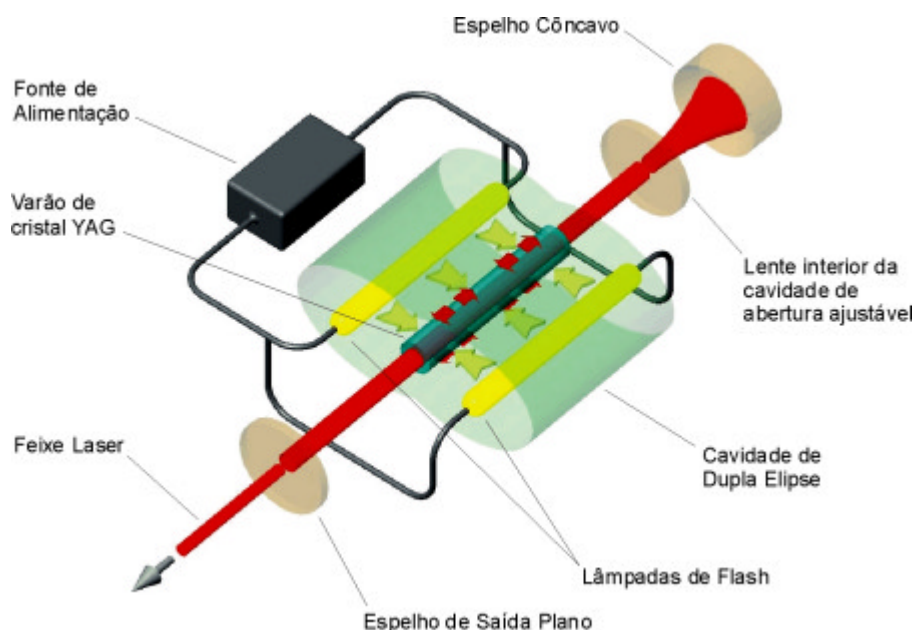


Figura A1.1 – Representação esquemática do funcionamento do laser Nd:YAG

A emissão espontânea do feixe laser ocorre com a emissão de fótons no comprimento de onda de 1064nm.

A cavidade contém o varão de cristal YAG e encontra-se delimitada por um espelho côncavo posterior opaco e por um outro espelho frontal plano transparente. O cristal possui tipicamente a forma cilíndrica embora possam surgir outras geometrias em lasers de potências mais elevadas, é polido e nas faces de topo é aplicado um tratamento anti-reflexo. No interior da cavidade encontram-se as lâmpadas que promovem a estimulação dos iões Nd^{3+} , alimentadas por uma fonte de alimentação. Embora não esteja representada na Figura A1.1, deverá existir uma unidade destinada ao arrefecimento do laser dado que um sobreaquecimento do varão de YAG o poderá danificar [4].

O fenómeno da inversão populacional (Figura A1.2), essencial ao funcionamento de um laser, resulta da rápida elevação do nível de energia dos iões Nd^{3+} para um nível de energia E_2 de curta duração. Durante o processo de excitação, ocorre uma queda de energia para o nível energético E_1 de maior duração, estado metaestável, o que origina um aumento de população neste nível. Nesta fase não há emissão de radiação, esta só tem lugar na transição entre o estado E_1 e o estado fundamental E_0 [1].

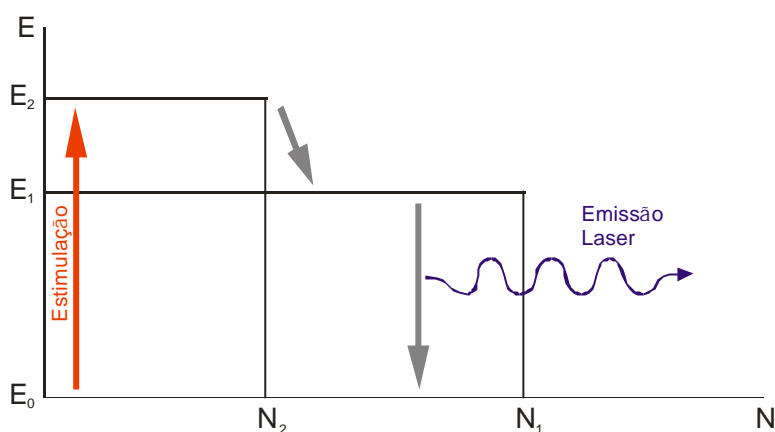


Figura A1.2 – Princípio da inversão populacional

A1.2.3. Parâmetros de Operação

Os principais parâmetros de operação de um Laser são:

- Intensidade do feixe laser
- Duração do impulso
- Q-Switch
- Energia do impulso
- Comprimento de onda

A1.2.4. Diâmetro do feixe laser

O comprimento de onda afecta directamente o diâmetro do feixe laser [5]. Este diâmetro deverá ser tanto mais baixo quanto mais pequena for a estrutura ou geometria a realizar. O diâmetro mínimo teórico do feixe laser, d_{\min} pode ser determinado por meio da seguinte equação:

$$d_{\min} = \frac{4M^2 F \lambda}{\pi D_L} \quad (\text{A1.1})$$

onde M^2 é o factor de qualidade do feixe relativamente a uma distribuição normal, F é a distância focal, λ é o comprimento de onda e D_L é o diâmetro do feixe laser na lente.



O valor M^2 é característico de cada laser e dependerá directamente da vida útil dos seus componentes internos, cavidade, espelhos, lâmpadas ou diodos e lentes [6]. A qualidade do feixe laser pode ser determinada a quando da sua construção mas não será constante ao longa da sua vida, obrigando a ajustes contínuos dos seus parâmetros operatórios e à manutenção cuidada dos seus componentes de modo a garantir a conformidade dos produtos processados pelo laser.

A qualidade máxima possível de atingir num feixe laser é obtida para um feixe gaussiano de difracção limitada, ou seja, com valor M^2 igual a 1 [7]. Este valor ideal é aproximado por muitos lasers contudo, pode atingir valores na casa das centenas para lasers de elevada potência.

A1.2.5. Material processado

O material a processar possui, dependendo da sua estrutura atómica, reflectividades diferentes quando exposto a diferentes comprimentos de onda. O processo será mais eficaz quando for utilizado um comprimento de onda que seja menos reflectido pelo material a processar, o que se traduzirá na absorção de maior energia necessária para a sublimação de material.

Os metais, devido aos seus electrões livres, são materiais com elevada reflectividade quando sujeitos a comprimentos de onda longos, devendo portanto serem utilizados feixes laser com comprimentos de onda curtos e facilmente absorvidos pelo metal. Tal é indicado na Tabela A1.1, em que se apresentam os valores de reflectividade em termos percentuais para materiais sujeitos a irradiação em comprimentos de onda standard.

Tabela A1.1: Reflectividade em termos percentuais de materiais sujeitos a comprimentos de onda standard de alguns lasers comerciais, à temperatura ambiente [4].

Material	Comprimento de onda		
	Laser CO ₂ 10600nm	Laser Nd:YAG 1064nm	Laser Nd:YAG (2ª harmónica) 532nm
Ferro	88	75	50
Cobre	99	97	61
Níquel	95	73	60
Silicone	75	30	42



Os mecanismos de absorção de energia encerram também algumas particularidades importantes no processo de sublimação de metais. A aplicação de comprimentos de onda de luz mais curtos possibilita a absorção de energia em volumes de material mais reduzidos, diminuindo assim a condução térmica de calor, evitando assim afectar as zonas adjacentes.

A profundidade penetração do feixe laser, W , é por seu turno função do comprimento de onda e do coeficiente de extinção K [4].

$$W = \frac{I}{4pK} \quad (\text{A1.2})$$

O coeficiente de extinção é função da temperatura e do comprimento de onda [8]. A Tabela A1.2 resume algumas propriedades ópticas de alguns materiais quando sujeitos a radiação no comprimento de onda de 1064nm.

Tabela A1.2: Propriedades ópticas de materiais sujeitos a radiação no comprimento de onda de 1064nm [8].

Material	Coefficiente de extinção K	Coefficiente de refração n	Reflectividade R
Alumínio	8,50	1,75	0,91
Ferro	4,44	3,81	0,64
Cobre	6,93	0,15	0,99
Níquel	5,26	2,62	0,74
Molibdénio	3,55	3,83	0,57
Titânio	4,00	3,80	0,63
Estanho	1,60	4,70	0,46
Zinco	3,48	2,88	0,58
Vidro	0	1,50	0,04

A1.2.6. Profundidade de penetração térmica

A duração do impulso é um parâmetro igualmente significativo na aplicabilidade do laser ao processo de sublimação de metais. Existem vários lasers no mercado, com durações de impulso que vão desde a operação contínua até aos femtosegundos. Contudo, para além do significativo aumento dos custos de aquisição e operação, a diminuição da duração de impulso é conseguida à custa da redução da potência do laser.



Todavia, o benefício proporcionado pela redução da duração do impulso traduz-se na redução da interacção do laser com o material, diminuindo assim a carga térmica sobre este. O risco de sobreaquecimento ou sobrefusão das áreas envolventes às processadas fica assim minimizado.

A profundidade de penetração térmica D é função da difusividade térmica do material k e do tempo de duração do impulso t , tal como se indica na seguinte equação:

$$D = \sqrt{4kt} \quad (\text{A1.3})$$

A redução da duração do impulso faz também com que a densidade de potência aplicada em cada impulso aumente, aumentando também a capacidade de fusão e vaporização de material e consequentemente, a taxa de remoção de material.

A1.2.7. Q-Switch

Em funcionamento normal, a cavidade óptica de um laser quase não apresenta perdas, apresentando um factor de qualidade Q elevado. Quando se dá o fenómeno da inversão populacional e esta atinge valores elevados de energia, a radiação na cavidade aumenta rapidamente e a energia nela contida é emitida num só impulso. Este impulso despovoia repentinamente o estado de energia mais elevado, reduzindo-se o ganho de operação até que a acção do laser termina. O Q-Switch tem por função forçar perdas dentro da cavidade quando o ganho do meio activo está próximo da saturação. O efeito de QSwitching pode ser realizado através da rotação de um dos espelhos que formam a cavidade óptica ou através de moduladores electro-ópticos que funcionam como obturadores. Quando o obturador está fechado ou um espelho está desalinhado, o valor Q da cavidade óptica é baixo. Ao comutar, o factor Q aumenta rapidamente [9].

A técnica de QSwitching possui um efeito importante nas características dos feixes de luz emitidos pelos lasers de estado sólido, em especial, pelos lasers Nd:YAG. Por comutação e consequente aumento repentino do factor Q , um laser Nd:YAG que tipicamente emite impulsos



na ordem de alguns ms, com uma potência máxima na ordem dos KW pode passar a emitir picos de potência de alguns MW com durações de impulso na ordem dos μ s [9].

A Tabela A1.3 ilustra algumas técnicas de QSwitching que podem ser utilizadas em lasers Nd:YAG assim como as suas características.

Tabela A1.3: Técnicas de Q-Switching para lasers [9]

Técnica	Esquema	Características
Rotação do espelho		<p>Simples e económico de implementar</p> <p>Tempos de abertura lentos e imprecisos e vibrações</p> <p>Muito rápido, de alta precisão e estável</p>
Electro-óptico		<p>Dispendioso de implementar, necessita de uma fonte de alta tensão</p>
Acústico-óptico		<p>Tempos de abertura lentos</p> <p>Baixas perdas ópticas</p> <p>Electrónica simples</p>
Absorção saturável		<p>Simples dada a minimização de componentes ópticos</p> <p>Instabilidade no feixe e degradação foto-química</p>
Película absorvora		<p>Modo simples e rápido para um único disparo mas pouco prático quando se pretendem realizar vários</p>



A1.3. Referências

- [1] Meijer, J.; Laser micromachining; Livro, Edição, 203-324, Capítulo 8, Ano
- [2] Big Sky Laser Technologies Inc.; *The photonics design and applications handbook*; 209-211, 2005
- [3] Osório, A.; Silva, A.; Fabrico de Cavidades Moldantes para Moldes de Injecção utilizando a Tecnologia de Erosão Laser 3D; *Tecnologias Inovadoras para o Fabrico Rápido de Ferramentas*, 36-51, 2005
- [4] Santos, J.; Quintino, L.; Miranda, R. ; Processamento de Materiais por Feixe de Electrões, Laser e Jacto de Água, 1ª Edição, 92-95, Edições Técnicas do Instituto de Soldadura e Qualidade, 1991
- [5] Henry, M.; Harrison, P.; Henderson, I.; Brownell, M.; Laser Milling – A Practical Industrial Solution for Machining a Wide Variety of Materials; Proceedings of The 5th Symposium on Laser Precision Manufacturing – Science and Applications, 2004
- [6] Prenel, J.; Physique du laser; Techniques de l'Ingénieur, traité Sciences fondamentales AF3 270, 13
- [7] Ferreira, M.; Óptica e Fotónica; 1ª Edição; 251-309; Capítulo 13, Lidel – Edições Técnicas, 2003
- [8] Section 2.9: Reflection and Absorption of Laser Beams; Laser Machining Processes; acedido a 22-02-2006 em <http://www.mrl.columbia.edu/ntm/level2/ch02/html/l2c02s09.html>
- [9] Aguilar, A; Physics 709 Graduate Seminar, Fall 2001; 12-13



Anexo A2 | Rugosidade

A2.1. Introdução

A rugosidade é o indicador do estado de uma superfície, dependendo obviamente do processo tecnológico pelo qual foi obtida e dos parâmetros utilizados nesse mesmo processo [1].

O parâmetro rugosidade está também associado à funcionalidade atribuída à superfície a que se refere, ou seja, um acabamento superficial excelente pode nem sempre ser desejável se o objectivo for minimizar o atrito por contacto e a sua obtenção pode implicar a utilização de processos tecnológicos morosos ou mesmo muito mais sofisticados e inerentemente mais dispendiosos.

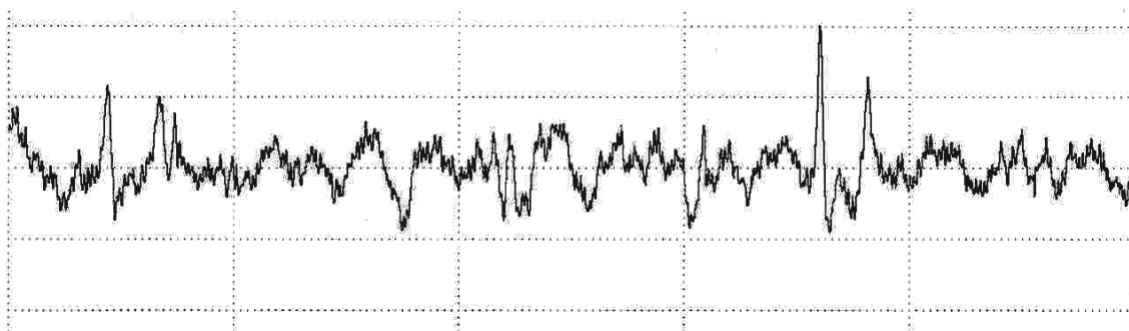


Figura A2.1 – Exemplo de um perfil de rugosidade.

O controlo da rugosidade será necessariamente diferente em função das superfícies onde é medida, dependendo da sua funcionalidade. Atendendo a esse critério, as superfícies podem classificar-se como:

- Não-funcionais: a rugosidade destas não é problemática dado que a sua aparência não é importante, podendo até atender a factores de ordem estética e
- Funcionais: a rugosidade destas obedece a critérios cuja natureza é regulada por questões de funcionamento do componente a que pertence a superfície e pelas superfícies de outros componentes que interajam com esta.



A utilização deste critério permite a optimização na selecção dos processos tecnológicos e dos seus parâmetros tendo em conta a função da superfície em causa.

Cada processo, independentemente dos parâmetros tecnológicos e das estratégias de processamento, vai produzir na superfície processada um padrão característico.

No caso do corte por arranque de apara, esta característica é muito vincada, não só pela geometria da ferramenta de corte como também pelo seu estado, isto é, pelo seu alinhamento com as eventuais restantes arestas de corte e também pelo eventual estado de degradação da aresta de corte da ferramenta.

No caso particular desta dissertação, o processo tecnológico da sublimação de metais por laser não utiliza uma ferramenta física, inibindo-se portanto os factores inerentes ao estado da ferramenta. Contudo, os parâmetros e as estratégias utilizadas no processamento desempenharão um papel preponderante no estado das superfícies obtidas.

Este processo poderá então considerar-se como periódico dado que os vários varrimentos efectuados pelo feixe laser é realizado com incrementos laterais regulares formando por isso, uma superfície anisotrópica.

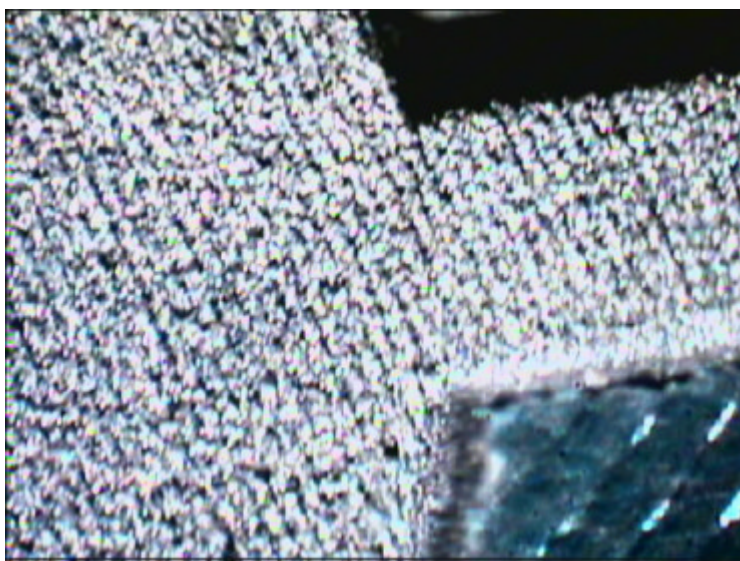


Figura A2.2 – Fotografia ampliada 20x de uma cavidade obtida por maquinaria laser, onde se pode notar claramente o padrão deixado pelo tipo de varrimento efectuado sobre a peça.



Nos capítulos seguintes deste anexo, serão enumerados os parâmetros de rugosidade utilizados para análise do processo de maquinação em estudo, analisada a forma de cálculo respectiva assim como a caracterização que estes fazem da rugosidade da superfície.

A2.2. R_a , Rugosidade Média

O parâmetro R_a , também conhecido como CLA (Center Line Average) ou AA (Arithmetic Average) é o mais antigo dos parâmetros de rugosidade conhecidos.

R_a é a distância média do perfil medido à linha média, correspondente à superfície nominal, traduzida pela Equação A2.1:

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (\text{A2.1})$$

O parâmetro R_a é essencialmente utilizado para avaliar condições de desgaste de ferramentas durante o processo produtivo. Por ser insensível ao facto de esses desvios poderem ocorrer quer para cima ou para baixo da linha média, este parâmetro pode ser enganoso quanto ao estado real de uma superfície.

A2.3. R_{max} , Altura máxima entre picos e vales

Dentro do comprimento de ensaio (L_i), o perfil de rugosidade obtido é dividido em 5 troços de comprimento igual (L_c), onde é determinado z_i , ou seja a altura existente entre o pico mais elevado e o vale mais profundo, ambos relativamente à linha média dentro desse troço.

R_{max} é o maior dos valores obtidos para cada um dos 5 troços L_c .

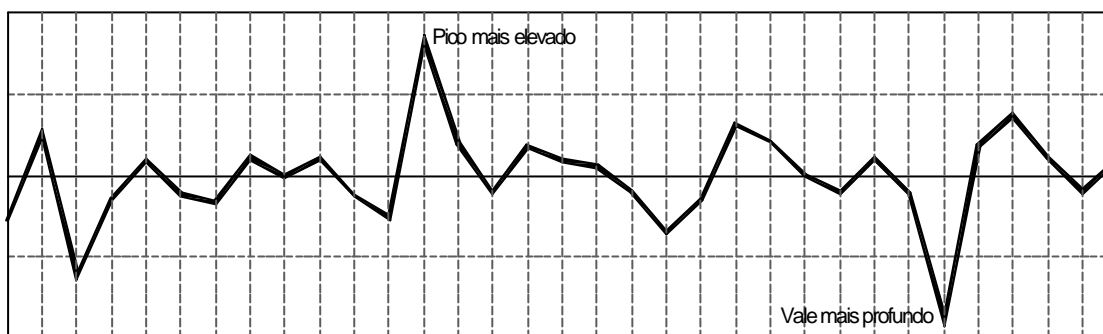


Figura A2.3 – Picos e vales em um dos troços L_c de um perfil de rugosidade.

A2.4. R_z , Média das alturas máximas entre picos e vales

O parâmetro R_z existe com a mesma designação segundo duas normas distintas, a DIN 4768 e a ISO 4287. Embora sejam similares em significado, os seus valores são calculados de forma diferente, assim, quando este parâmetro for referido, deverá utilizar-se o sufixo correspondente, $R_{z(DIN)}$ ou $R_{z(ISO)}$.

Existem outros parâmetros derivados do R_z , denominados respectivamente como R_{3z} e R_{3zmax} , que por serem parâmetros apenas definidos por normas internas de empresas, não serão alvo de análise neste pequeno estudo.

A2.4.1. $R_{z(DIN)}$, segundo a norma DIN 4768

R_{max} e $R_{z(DIN)}$ estão fortemente ligados uma vez que $R_{z(DIN)}$ resulta da média aritmética dos 5 valores de z obtidos para o cálculo de R_{max} . Pelo facto de estarem em causa no cálculo deste parâmetro os valores máximos entre picos e vales em detrimento de valores médios, o parâmetro $R_{z(DIN)}$ denota uma maior sensibilidade a alterações na superfície avaliada.

De acordo com a norma DIN 4768, o valor de $R_{z(DIN)}$ é dado pela Equação A2.2:

$$R_{z(DIN)} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 z_i \quad (A2.2)$$



A2.4.2. $R_{z(ISO)}$, segundo a norma ISO 4287

Segundo a norma ISO 4287, $R_{z(ISO)}$ é calculado através da média das distâncias máximas entre os 5 picos mais elevados e os 5 vales mais profundos em todo o comprimento de ensaio (L_t). Ao contrário do que acontece com $R_{z(DIN)}$, em que cada z_i é calculado dentro de cada troço L_c , para o cálculo de $R_{z(ISO)}$, os picos e os vales podem estar localizados em qualquer posição dentro de L_t . De acordo com a norma ISO 4287, o valor de $R_{z(ISO)}$ é dado pela Equação A2.3:

$$R_{z(ISO)} = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 z_{(pico)_i} + \sum_{i=1}^5 z_{(vale)_i} \right) \quad (A2.3)$$

A2.4.3. $R_{z(DIN)}$, $R_{z(ISO)}$ e R_{max}

A grande diferença entre os dois valores de R_z consiste no facto de que, para $R_{z(ISO)}$, os valores podem ser medidos entre um pico e um vale localizados em troços L_c distintos ao passo que, para $R_{z(DIN)}$, estes valores são obtidos dentro do mesmo L_c .

Tal diferença pode tornar-se uma vantagem na medição de rugosidade em comprimentos de ensaio curtos onde $R_{z(DIN)}$ não pode ser avaliado correctamente se não existir um pico ou um vale significativo em cada L_c .

Contudo, se existirem vários picos e vales com significado muito próximos, o valor de $R_{z(ISO)}$ pode ser enganoso, uma vez que apenas contabiliza os troços L_c onde o perfil é mais acidentado, enquanto que $R_{z(DIN)}$ contabiliza os acidentes no perfil de rugosidade ao longo de todo o comprimento de ensaio L_t .

Os valores de R_z e R_{max} , quando utilizados em conjunto, são um indicador importante quanto ao estado de uma superfície maquinada no decurso de um processo produtivo. Quando ambos estes valores se assemelham, podem indicar um bom estado superficial, contudo, se forem muito diferentes, poderão indicar defeitos superficiais assinaláveis.



A2.5. R_k , Rugosidade Estatística

O parâmetro R_k é calculado a partir da curva de relação de material (M_r) ou curva de Abbott-Firestone, segundo a norma DIN 4776. A curva M_r é expressa como uma curva contínua que reflecte a quantidade de picos e vales existentes no perfil de rugosidade obtido, resumindo dessa forma a informação geométrica relativa ao estado da superfície [2].

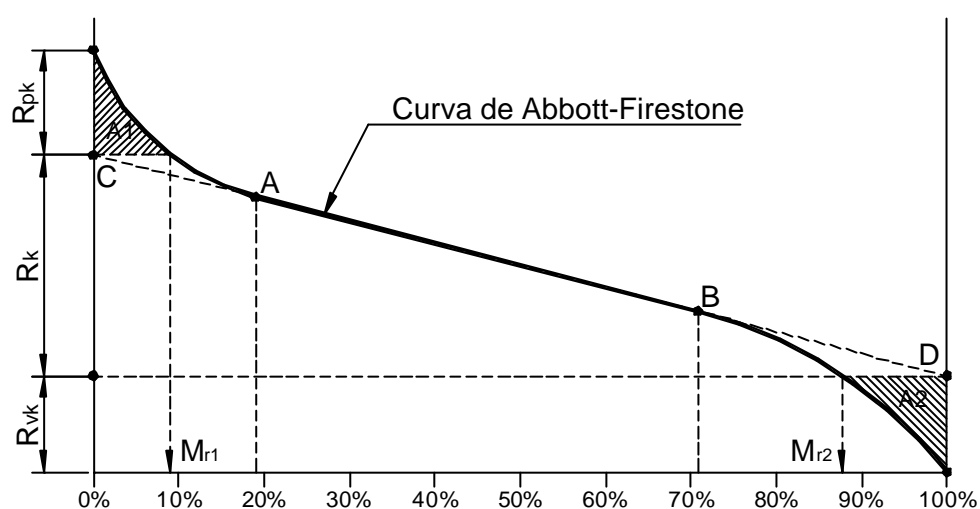


Figura A2.4 – Curva de relação de material ou curva de Abbott-Firestone

A medição deste parâmetro é realizada pela divisão da curva de Abbott-Firestone em três secções distintas, contendo:

- Os picos mais elevados (R_{pk}),
- Os patamares e os picos e vales menos acentuados (R_k) e
- Os vales mais profundos (R_{vk}).

A obtenção do parâmetro R_k baseia-se na determinação da zona da curva de relação de material com menor declive num intervalo de 40%.



Encontrado esse troço da curva com menor declive, entre os pontos A e B, é traçada uma recta colinear com esse troço que intersecta os valores a 0% e a 100%, obtendo-se os pontos C e D.

Projectando para a esquerda os pontos C e D, ter-se-ão para os seguintes parâmetros:

R_k – altura entre os dois pontos de intercepção determinados, C e D.

R_{pk} – estimativa da altura média dos picos acima de C.

R_{vk} – estimativa da profundidade média dos vales abaixo de D.

M_{r1} – fracção da superfície constituída por picos elevados.

M_{r2} – fracção da superfície constituída por vales profundos.

A_1 – área correspondente à fracção de picos existentes no perfil de rugosidade.

$$A_1 = \frac{1}{2} \times \frac{R_{pk} \times M_{r1}}{100\%} \quad (A2.4)$$

A_2 – área correspondente à fracção de vales existentes no perfil de rugosidade, também denominada genericamente como o volume de retenção de lubrificante da superfície (V_0).

$$A_2 = \frac{1}{2} \times \frac{R_{vk} \times (100\% - M_{r2})}{100\%} \quad (A2.5)$$



A2.6. Equipamento utilizado

As medições de rugosidade realizadas no decurso desta dissertação foram obtidas por um rugosímetro Mahr, modelo Marsurf M2.



Figura A2.5 – Rugosímetro Mahr, modelo Marsurf M2.

Este equipamento funciona por contacto, possui uma gama de medição de 150 μ m, memoriza até 200 medições consecutivas e possui uma impressora térmica incorporada para a emissão de resultados [3].

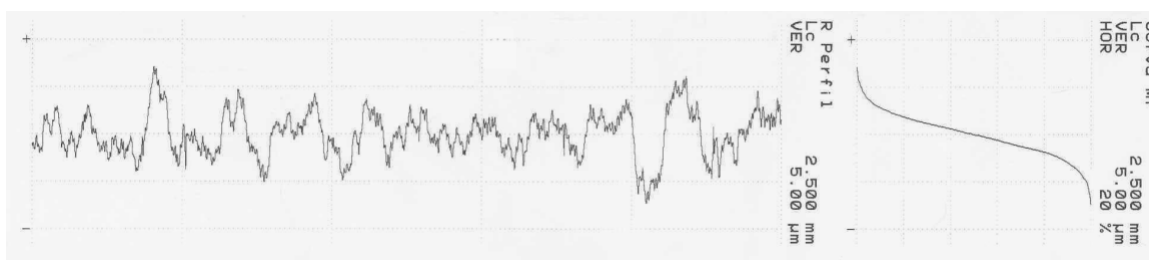


Figura A2.6 – Perfil de rugosidade e respectiva curva de relação de material, obtidos automaticamente a partir de leitura realizada pelo rugosímetro Mahr, modelo M2.



A2.7. Análise dos parâmetros de rugosidade abordados

A abordagem aqui realizada tem por objectivo a selecção de um parâmetro de rugosidade que traduza fielmente o estado da superfície processada e que seja o indicador do desempenho do processo tecnológico pelo qual se obtêm essa mesma superfície.

Para a técnica de processamento em causa, a micro-maquinação por laser, sendo esta considerada como periódica, a adopção de parâmetros de rugosidade como indicador da qualidade do processamento deve ser rodeada de algumas precauções que evitem interpretações erróneas da qualidade da superfície obtida.

Dentro dos parâmetros disponibilizados pelo equipamento de medição utilizado, já previamente abordados quanto ao seu significado e ao seu cálculo, existem factores que os poderão tornar menos adequados para a análise comparativa entre medições distintas.

A2.7.1. R_a versus outros parâmetros

Este parâmetro é utilizado essencialmente para monitorização de processos produtivos onde ocorram alterações graduais no acabamento superficial devido à degradação da ferramenta durante o processo de corte.

O parâmetro R_a não faz qualquer distinção entre picos e vales, na sua forma de cálculo, os seus valores são contabilizados em valor absoluto, dissolvendo-se por isso os acidentes do perfil de rugosidade numa rugosidade média, pouco clara, tornando este parâmetro impróprio para medições em que se pretenda a detecção de anomalias superficiais localizadas.



A2.7.2. R_{\max} versus outros parâmetros

O parâmetro R_{\max} é bastante sensível a qualquer acidente no perfil de rugosidade dado que é calculado entre o pico mais elevado e o vale mais profundo dentro de cada troço L_c . A sua utilização prende-se essencialmente com o controlo de superfícies onde se pretenda minimizar os defeitos superficiais, contudo, o grau de exigência a impor com a utilização de R_{\max} deverá ser ponderado em função do tempo de processamento e dos custos inerentes ao processo tecnológico em uso.

A2.7.3. $R_{z(DIN)}$ versus outros parâmetros

Este parâmetro, segundo a norma DIN 4768, está intimamente ligado ao R_{\max} porque é calculado a partir dos 5 valores R_{\max} obtidos para cada troço L_c . Pelo facto de utilizar para cálculo a média desses 5 valores, torna-se menos sensível do que o parâmetro R_{\max} mas muito mais realista quanto ao estado da superfície do que o parâmetro R_a .

A2.7.4. R_{\max} e $R_{z(DIN)}$ versus outros parâmetros

A utilização conjunta destes dois parâmetros, torna-os excelentes indicadores quanto à qualidade de processamento. Testes efectuados em estudos anteriores permitem concluir que quando os valores de ambos os parâmetros são similares, são sinónimo de um bom acabamento superficial. Por outro lado, quando os valores de $R_{z(DIN)}$ e $R_{z(ISO)}$ divergem, são indicativos da existência de defeitos superficiais significativos.



A2.7.5. $R_{z(ISO)}$ versus outros parâmetros

O parâmetro R_z , segundo a norma ISO 4287, é calculado a partir dos 5 picos mais elevados e dos 5 vales mais profundos, independentemente de onde estes se encontrem dentro do perfil. Esta característica torna este parâmetro bastante apto para a avaliação de superfícies pequenas, logo com perfis de rugosidade bastante curtos. Contudo, se todos os picos e vales utilizados para cálculo estiverem localizados muito próximos, o valor de $R_{z(ISO)}$ pode não ser representativo da toda a superfície avaliada.

A2.7.6. R_k versus outros parâmetros

Este parâmetro baseia-se na curva de relação de material ou curva de Abbott-Firestone (M_r), o que permite a filtragem dos picos e vales situados nos extremos. O cálculo do parâmetro R_k consiste na determinação do troço da curva M_r com o menor declive o que, para um processo tecnológico da natureza daquele que é abordado nesta dissertação, fará com que esse troço se aproxime da horizontal, deixando os valores M_{r1} e M_{r2} muito próximos dos extremos da curva M_r . Isto significará que o parâmetro R_k abrangerá sempre a grande maioria (mais de 80%) dos picos e vales constantes no perfil.

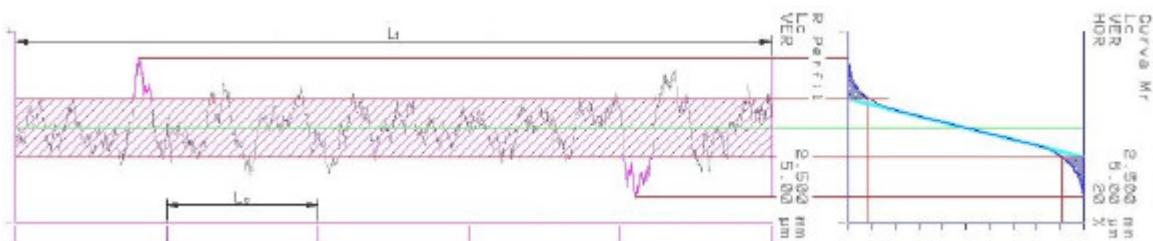


Figura A2.7 – Tratamento gráfico ao perfil de rugosidade e à respectiva curva de relação de material, mostrando que a maioria dos picos e vales se situam dentro da gama de R_k , na curva M_r , cada divisão na escala corresponde a 10%.



A2.8. Conclusão

Face às vantagens e desvantagens apresentadas no Capítulo A2.7 deste Anexo e atendendo que se pretendem impor critérios de natureza produtiva, logo, privilegiando a relação produtividade/custos, a escolha dos parâmetros de avaliação deverá reflectir essa mesma preocupação.

O parâmetro R_a é claramente pouco exigente para um processo tecnológico associado à micro-maquinação, não sendo de forma alguma elegível para o controlo do processo, sendo futuramente apenas mostrado para validação.

A utilização do parâmetro $R_{z(ISO)}$ não se revela necessária apesar das dimensões submilimétricas das estruturas a realizar. A adopção de comprimentos de ensaio L_t de 17.5mm é importante para a determinação da capacidade produtiva do processo de maquinação laser, pelo que o parâmetro $R_{z(ISO)}$ perde relevância nessas circunstâncias.

O parâmetro que surge como mais significativo para este processo é o R_k , embora este possa ser complementado com a utilização conjunta de R_{max} e $R_{z(DIN)}$. O processo da micro-maquinação por laser, tal como já foi descrito anteriormente, é um processo anisotrópico, as estratégias e os parâmetros tecnológicos utilizados influenciam fortemente o acabamento superficial. Na Figura A2.7, é possível verificar que o parâmetro R_k é suficientemente abrangente para caracterizar fielmente toda a superfície avaliada, tornando este parâmetro num excelente indicador para o estado da superfície.



A2.9. Referências

[1] Mummery, L.; Surface Texture Analysis: The Handbook; 2ª Edição, Hommelwerke GmbH, Capítulo 3, 1992

[2] Surface Metrology Guide; Precision Devices, Inc.; acedido a 24-05-2005 em www.predev.com/smg/index.html;

[3] MarSurf M2 Products; acedido a 24-05-2005 em www.mahr.com/index.php?NodeID=2481&SessionID=JNj1ciP9FppfZbbwVmDQBi23SEljbM&SourceID=2409&LayerMenuID=3#CID362



Anexo A3 | Ansys – *Input Files* utilizados

A3.1. Algoritmo

A opção pela utilização de *input files* permitiu uma maior flexibilidade à simulação e uma melhor automatização da análise. Foram criados dois *input files*, um para cada material, dadas as diferenças não apenas no fluxo de calor aplicado como também na velocidade de varrimento.

O algoritmo para cada um destes ficheiros é igual, variando somente os valores referidos anteriormente. No caso particular da velocidade de varrimento, a diferença entre os dois ficheiros reside no tempo de aplicação do fluxo de calor.

O algoritmo utilizado é o seguinte [1]:

- Definição do tipo de elemento a utilizar
- Definição das propriedades térmicas do material em estudo
- Definição da geometria
- Definição da dimensão da malha
- Geração da malha de elementos finitos
- Definição das condições de fronteira (temperatura ambiente e tempo)
- Definição do tipo de análise térmica a efectuar (neste caso, transiente)
- Aplicação do fluxo térmico sobre o primeiro elemento definido
- Ciclo de repetição até ao último elemento definido:
 - Eliminação do fluxo térmico aplicado no elemento
 - Incrementação para o elemento seguinte
 - Aplicação do fluxo térmico sobre o elemento actual
- Determinação da solução da análise
- Exibição da solução



A3.2. Listagens

Input file para a simulação do varrimento em aço temperado

```
/title,TEMPERED STEEL - Nd:YAG@1064nm; P=37W; V=200mm/s; Esize=0.05mm
/filnam,St_0-05_RO-14_V200
/TRIAD,RBOT
/PREP7
ET,1,PLANE77
UIMP,1,DENS,,7850,
UIMP,1,KXX,,47,
UIMP,1,C,,460,
RECTNG,0,0.006,0,0.001
/REPLOT,RESIZE
type,1
mat,1
ESIZE,0.00005,0
MSHKEY,1
amesh,1
/PSF,HFLU,,2,0
finish
/SOLU
ANTYPE,trans
TRNOPT,FULL
NROPT,AUTO,,
EQSLV,
SOLCONTROL,ON
AUTOTS,on
KBC,1
OUTRES,ALL,ALL,
TIME,0.0001
DELTIM,0.00025,0.00025,0.00025
TUNIF,25,
solve
j=0.00025
*DO,i,2291,2390,1
    TIME,j
    DELTIM,0.00025,0.00025,0.00025,
    SFEDELE,i-1,3,HFLUX
    SFE,i,3,HFLUX,,2638152336,,
    eplot
    solve
    j=j+0.00025
*ENDDO
finish
/POST1
/EFACE,1
```



Input file para a simulação do varrimento em duro-alumínio

```
/title,ALUMINIUM ALLOY - Nd:YAG@1064nm; P=37W; V=300mm/s; Esize=0.05mm
/filnam,Al_0-05_R0-18_V300
/TRIAD,RBOT
/PREP7
ET,1,PLANE77
UIMP,1,DENS, , ,2800 ,
UIMP,1,KXX, , , 130 ,
UIMP,1,C, , , 960,
RECTNG,0,0.006,0,0.0015
/REPLOT,RESIZE
type,1
mat,1
ESIZE,0.00005,0
MSHKEY,1
amesh,1
/PSF,HFLU, ,2,0
finish
/SOLU
ANTYPE,trans
TRNOPT,FULL
NROPT,AUTO, ,
EQSLV,
SOLCONTROL,ON
AUTOTS,on
KBC,1
OUTRES,ALL,ALL,
TIME,0.0001
DELTIM,0.00016666,0.00016666,0.00016666
TUNIF,25,
solve
j=0.00016666
*DO,i,3491,3590,1
    TIME,j
    DELTIM,0.00016666,0.00016666,0.00016666,
    SFEDELE,i-1,3,HFLUX
    SFE,i,3,HFLUX, ,3391910147, , , 3391910147,174473395906450764995
    eplot
    solve
    j=j+0.00016666
*ENDDO
finish
/POST1
/EFACE,1
set,last
PLNSOL,TEMP, ,0,
```



A3.3. Referências

[1] Liu, Thomas Jin-Chee; Heat Transfer Input Files –
ansys.net search results; acedido a 7-9-2005 em
[http://ansys.net/ansys/?mycat=search&mytype=InputFile&
mycategory=HeatXfer](http://ansys.net/ansys/?mycat=search&mytype=InputFile&mycategory=HeatXfer)