



Influência dos parâmetros de marcação laser na qualidade do conteúdo marcado

JOÃO PEDRO DOS SANTOS MATOS DA COSTA

julho de 2022

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE MARCAÇÃO LASER NA QUALIDADE DO CONTEÚDO MARCADO

João Pedro Costa
1130289

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE MARCAÇÃO LASER NA QUALIDADE DO CONTEÚDO MARCADO

João Pedro Costa
1130289

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva e Professor Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto.

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

JÚRI

Presidente

Doutora Sandra Cristina de Faria Ramos

Professor Adjunto, ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Coordenador com Agregação, ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

Co-orientador

Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto

Professor Adjunto, ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutor António Manuel de Bastos Pereira

Professor Associado com Agregação, Departamento de Engenharia Mecânica,
Universidade de Aveiro

AGRADECIMENTOS

É impreterível começar por agradecer a quem, de uma forma geral, contribuiu, quer diretamente, acrescentando valor ao conteúdo desta dissertação, quer indiretamente, incentivando e motivando o desenvolvimento deste trabalho.

Especificamente, gostava de agradecer aos meus orientadores por parte do ISEP: Eng. Francisco Silva e Eng. Arnaldo Pinto pela disponibilidade, orientações e recomendações ao longo da dissertação, e também a todos os meus colegas de curso.

Ao meu orientador de empresa: Eng. José Brito. Pela oportunidade de desenvolver este projeto no Departamento de Engenharia de Industrialização, na Bosch. Por todo o apoio, partilha de conhecimento e confiança nas minhas potencialidades, criando um ambiente propício para o desenvolvimento deste projeto. Presto o meu agradecimento aos colaboradores da Bosch, em especial ao Tiago Silva, Rui Pacheco, Vasco Pinto, Alexandre Pitães e Armando Alves, pertencentes à equipa do projeto.

Por fim, gostava de agradecer aos meus pais, à minha irmã e à minha namorada, assim como aos restantes membros da família e amigos, elementos fundamentais na minha vida, que me dão apoio em momentos decisivos, aconselhando e orientando sempre para bons caminhos.

PALAVRAS CHAVE

Qualidade da Marcação *Laser*; Parâmetros de Marcação; DoE; Melhoria do Processo

RESUMO

A tecnologia *laser* tem um papel importante no ambiente industrial da atualidade. O processo de marcação *laser* é exemplo disso, e é normalmente selecionado para o final da cadeia produtiva, em que se efetua a customização dos produtos com a marcação de dados de rastreabilidade e de certificações para comercialização.

Um desafio existente na marcação *laser*, dada a dificuldade de criar contraste, é a marcação em materiais cuja refletividade cria problemas de legibilidade por dispositivos de decodificação eletrónicos presentes em linhas produtivas, os designados *scanners*. Este problema está relacionado com a má seleção dos parâmetros de marcação, que se traduz em desperdícios para as empresas ao nível de paragens produtivas por rejeição, produto sucitado e reclamações de cliente.

A presente dissertação foi desenvolvida na empresa Bosch Car Multimédia Portugal, S.A., numa linha de montagem final de painéis de instrumentos para motociclos, onde se realizaram ensaios com diferentes tipos de parâmetros de marcação *laser*, através da implementação de um DoE fatorial, num tipo de *laser* e material específico.

Posteriormente, em ambiente laboratorial, analisaram-se os códigos marcados através de um verificador para avaliar a qualidade segundo a norma ISO/IEC 29158:2020 e efetuou-se também uma análise detalhada das superfícies marcadas através de SEM - *Scanning Electron Microscopy* e EDS - *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*. Trataram-se os dados estatisticamente e tornou-se possível indicar o conjunto de parâmetros de marcação mais indicados para garantir a melhor qualidade e desempenho do processo.

Assim sendo, as empresas, tal como os profissionais que trabalham com equipamentos de marcação *laser*, podem adotar os procedimentos descritos ao longo deste estudo relativos à parametrização e manutenção.

Apenas desta forma se proporcionarão as condições para obter a melhor qualidade da marcação e evitará que as empresas tenham desperdícios e custos associados após a marcação *laser*.

KEYWORDS

Laser Marking Quality; Marking Parameters; DoE; Process Improvement

ABSTRACT

Laser technology plays an important role in today's industrial environment. The laser marking process is an example of this and is usually selected for the end of the production chain, in which products are customized with traceability data and certifications for commercialization.

An existing challenge in laser marking, given the difficulty of creating contrast, is marking on materials whose reflectivity creates readability problems by electronic decoding devices present in production lines, also known as scanners. This problem is related to the wrong selection of the marking parameters, which translates into waste for companies in terms of production stoppages due to rejection, scrap, and customer complaints.

The present dissertation was developed at Bosch Car Multimédia Portugal, S.A., in a final assembly line of instrument cluster for motorcycles where tests were carried out with different types of laser marking parameters, through the implementation of a factorial DoE, with a specific type of laser and material.

Afterwards, in a laboratory environment, the laser marked codes were analysed by means of a verifier to evaluate the quality according to the ISO/IEC 29158:2020 standard and a detailed analysis of the marked surfaces was also carried out using SEM - Scanning Electron Microscopy and EDS - Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy. The data were treated statistically, and it became possible to indicate the set of marking parameters to ensure the best quality and performance of the process.

Therefore, companies as well as professionals who work with laser marking equipment, can adopt the procedures described throughout this study regarding parameterization and maintenance.

Only in this way the conditions will be met to provide the best laser marking quality and prevent companies from having waste and associated costs after laser marking.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
AOI	<i>Automatic Optical Inspection</i>
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
ANU	<i>Axial Non-Uniformity</i>
BBS	<i>Bosch Business System</i>
BPS	<i>Bosch Production System</i>
CC	<i>Cell Contrast</i>
CM	<i>Cell Modulation</i>
CTQ	<i>Critical to Quality</i>
DMC	<i>Data Matrix Code</i>
DoE	<i>Design of Experiments</i>
DPM	<i>Direct Part Marking</i>
EDS	<i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i>
FPD	<i>Fixed Pattern Damage</i>
FR	<i>Flame Retardant</i>
GF	<i>Glass Fiber</i>
GNU	<i>Grid Non-Uniformity</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ISEP	<i>Instituto Superior de Engenharia do Porto</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LD	<i>Laser de Díodo</i>
MFE	<i>Manufacturing Engineering</i>
PBT	<i>Polybutylene Terephthalate</i>
PG	<i>Print Growth</i>
PRE	<i>Process Rules for Engineering</i>
PRP	<i>Process Rules for Production</i>
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i>
QbD	<i>Quality by Design</i>
QR	<i>Quick Response code</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>
TR	<i>Technical Report</i>
VLM	<i>Visual Laser Marker</i>
ZTA	<i>Zona Termicamente Afetada</i>

Lista de Unidades

Hz	Hertz
J	Joule
K	Kelvin
mm	Milímetro
ms	Milisegundo
nm	Nanómetro
s	Segundo
W	Watt
μm	Micrómetro
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius

Lista de Símbolos

CO ₂	Dióxido de carbono
%	Porcentagem
S/N	<i>Signal/Noise</i>

GLOSSÁRIO DE TERMOS

<i>Assembly</i>	Conjunto de operações que integram uma montagem final
<i>Scanner</i>	Dispositivos de descodificação eletrónicos normalmente utilizados em linhas produtivas para controlo de rastreabilidade
<i>Spot</i>	Área superficial irradiada pelo <i>laser</i>
<i>S/N Ratio</i>	Valor estatístico indicativo da dispersão num planeamento de experiências. Quanto menor for a dispersão presente nos dados, maior será o valor deste índice. Considera-se mais adequado aplicá-lo no Método Taguchi. Num fatorial completo recomenda-se a utilização da ANOVA
<i>Grade</i>	Classe de qualidade atribuída a um código. De acordo com a norma ISO/IEC 29158:2020, os códigos podem ser classificados em qualidade A (4.0), B (3.0), C (2.0), D (1.0) ou F (0.0), correspondendo: A, à melhor classificação, e F, à pior classificação

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - PLANEAMENTO DA QUALIDADE [12]	35
FIGURA 2 - GERADOR <i>LASER</i> . ADAPTADO DE [29]	44
FIGURA 3 - FENÓMENOS DE ABSORÇÃO, EMISSÃO ESPONTÂNEA E EMISSÃO ESTIMULADA. ADAPTADO DE [32]	45
FIGURA 4 - TIPOS DE SISTEMAS <i>LASER</i> . ADAPTADO DE [35].	46
FIGURA 5 - TUBO DE VIDRO DA MISTURA DE GASES NUM <i>LASER</i> CO ₂ . ADAPTADO DE [37]	49
FIGURA 6 - CONSTITUIÇÃO TÍPICA DE UM SISTEMA <i>LASER</i> CO ₂ . ADAPTADO DE [44]	50
FIGURA 7 - CONSTITUIÇÃO TÍPICA DE UM SISTEMA <i>LASER</i> DE FIBRA ÓTICA. ADAPTADO DE [44]	51
FIGURA 8 - FIBRA ÓTICA. ADAPTADO DE [53]	51
FIGURA 9 - CONSTITUIÇÃO BÁSICA DE UM DÍODO <i>LASER</i> . ADAPTADO DE [54]	52
FIGURA 10 - CONSTITUIÇÃO TÍPICA DE UM SISTEMA <i>LASER</i> DE DÍODO. ADAPTADO DE [55]	53
FIGURA 11 - PROCESSO DE MARCAÇÃO <i>LASER</i> E A INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM O MATERIAL. ADAPTADO DE [46]	55
FIGURA 12 - MÉTODOS DE MARCAÇÃO <i>LASER</i> EM METAIS	55
FIGURA 13 - MÉTODOS DE MARCAÇÃO <i>LASER</i> EM PLÁSTICOS	56
FIGURA 14 - ESQUEMA EXEMPLIFICATIVO DA DISTÂNCIA FOCAL, INTERVALO DE FOCAGEM E PONTO FOCAL. ADAPTADO DE [65]	59
FIGURA 15 - EXEMPLOS DE TIPOS DE PREENCHIMENTO [66]	60
FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO DE MARCAÇÃO <i>LASER</i> . ADAPTADO DE [67]	60
FIGURA 17 - TIPOS DE SOBREPOSIÇÃO NA MARCAÇÃO <i>LASER</i> . À ESQUERDA $D > D$ E À DIREITA $D \leq D$. ADAPTADO DE [7]	61
FIGURA 18 - PRINCIPAIS TIPOS DE CÓDIGOS E NORMAS ISO QUE DETERMINAM A SUA QUALIDADE. ADAPTADO DE [71]	62
FIGURA 19 - ELEMENTOS CONSTITUINTES DO DMC E DO QR. ADAPTADO DE [72]	63
FIGURA 20 - ENTRADAS E SAÍDAS DE UM PROCESSO PRODUTIVO. ADAPTADO DE [83]	74
FIGURA 21 - LOGOTIPO BOSCH [87]	79
FIGURA 22 - BOSCH BUSINESS SYSTEM [88]	80
FIGURA 23 - VALORES BOSCH [88]	80
FIGURA 24 - BOSCH CAR MULTIMÉDIA PORTUGAL, S.A.	81
FIGURA 25 - ÁREA COMERCIAL [89]	81
FIGURA 26 - ÁREA TÉCNICA [89]	81
FIGURA 27 - PRINCIPAIS CLIENTES DA BOSCH CAR MULTIMÉDIA S.A. [89]	82
FIGURA 28 - PRODUTOS DA BOSCH CAR MULTIMÉDIA PORTUGAL S.A. [89]	83
FIGURA 29 - LAYOUT E FLUXO PRODUTIVO DA LINHA 2W02	85
FIGURA 30 - EQUIPAMENTO DE MARCAÇÃO <i>LASER</i> DE FIBRA ÓTICA INSTALADO NA LINHA 2W02	85
FIGURA 31 - PRODUTO E, COM <i>DISPLAY</i> DE 6.5"	86
FIGURA 32 - VISTA EXPLODIDA DO PRODUTO E	86
FIGURA 33 - CABEÇA DE MARCAÇÃO <i>LASER</i> UTILIZADA NO ESTUDO	90
FIGURA 34 - PARÂMETROS DE MARCAÇÃO <i>LASER</i> CONSIDERADOS NO ESTUDO	97
FIGURA 35 - EXEMPLO DE UM DMC COM QUALIDADE A	102

FIGURA 36 - EXEMPLO DE UM DMC COM QUALIDADE F	102
FIGURA 37 - GRÁFICO DE PARETO DOS EFEITOS PADRONIZADOS PARA O GRADE DO DMC	103
FIGURA 38 - GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS PARA O GRADE DO DMC	103
FIGURA 39 - GRÁFICO DE PARETO DOS EFEITOS PADRONIZADOS PARA O CC DO DMC	104
FIGURA 40 - GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS PARA O CC DO DMC	104
FIGURA 41 - GRÁFICO DE PARETO DOS EFEITOS PADRONIZADOS PARA O CM DO DMC	105
FIGURA 42 - GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS PARA O CM DO DMC	105
FIGURA 43 - GRÁFICO DE PARETO DOS EFEITOS PADRONIZADOS PARA O FPD DO DMC	106
FIGURA 44 - GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS PARA O FPD DO DMC	106
FIGURA 45 - GRÁFICO DE PARETO DOS EFEITOS PADRONIZADOS PARA O ANU DO DMC	107
FIGURA 46 - GRÁFICO DE PARETO DOS EFEITOS PADRONIZADOS PARA O GNU DO DMC	107
FIGURA 47 - GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS PARA O GNU DO DMC	108
FIGURA 48 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DO CC	108
FIGURA 49 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DO CM	109
FIGURA 50 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DO FPD	110
FIGURA 51 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DO ANU	111
FIGURA 52 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DO GNU	112
FIGURA 53 - GRÁFICO DE PARETO DOS EFEITOS PADRONIZADOS PARA O GRADE DO QR	113
FIGURA 54 - GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS PARA O GRADE DO QR	114
FIGURA 55 - GRÁFICO DE PARETO DOS EFEITOS PADRONIZADOS PARA O CC DO QR	114
FIGURA 56 - GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS PARA O CC DO QR	115
FIGURA 57 - GRÁFICO DE PARETO DOS EFEITOS PADRONIZADOS PARA O CM DO QR	115
FIGURA 58 - GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS PARA O CM DO QR	116
FIGURA 59 - GRÁFICO DE PARETO DOS EFEITOS PADRONIZADOS PARA O FPD DO QR	116
FIGURA 60 - GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS PARA O FPD DO QR	117
FIGURA 61 - GRÁFICO DE PARETO DOS EFEITOS PADRONIZADOS PARA O ANU DO QR	117
FIGURA 62 - GRÁFICO DE PARETO DOS EFEITOS PADRONIZADOS PARA O GNU DO QR	118
FIGURA 63 - GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS PARA O GNU DO QR	118
FIGURA 64 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DO CC	119
FIGURA 65 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DO CM	120
FIGURA 66 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DO FPD	120
FIGURA 67 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DO ANU	121
FIGURA 68 - LINHA DE TENDÊNCIA DOS RESULTADOS DO GNU	122
FIGURA 69 - GRÁFICO DE BARRAS DO CC POR QR	124
FIGURA 70 - COMPARAÇÃO ENTRE UMA AMOSTRA SEM MARCAÇÃO <i>LASER</i> A), B) E COM MARCAÇÃO <i>LASER</i> C), D)	125
FIGURA 71 - AMOSTRA MARCADA COM PI, FN, VN, SN. A) À ESCALA DE 1 MM; B) À ESCALA DE 100 MM	126
FIGURA 72 - AMOSTRA MARCADA COM PN, FN, VN, SN. A) À ESCALA DE 1 MM; B) À ESCALA DE 100 MM	126
FIGURA 73 - AMOSTRA MARCADA COM PS, FN, VN, SN. A) À ESCALA DE 1 MM; B) À ESCALA DE 100 MM	127

FIGURA 74 - AMOSTRA MARCADA COM PN, FI, VN, SN. A) À ESCALA DE 1 MM; B) À ESCALA DE 100 MM	127
FIGURA 75 - AMOSTRA MARCADA COM PN, FN, VN, SN. A) À ESCALA DE 1 MM; B) À ESCALA DE 100 MM	128
FIGURA 76 - AMOSTRA MARCADA COM PN, FS, VN, SN. A) À ESCALA DE 1 MM; B) À ESCALA DE 100 MM	128
FIGURA 77 - AMOSTRA MARCADA COM PN, FN, VI, SN. A) À ESCALA DE 1 MM; B) À ESCALA DE 100 MM	129
FIGURA 78 - AMOSTRA MARCADA COM PN, FN, VN, SN. A) À ESCALA DE 1 MM; B) À ESCALA DE 100 MM	129
FIGURA 79 - AMOSTRA MARCADA COM PN, FN, VS, SN. A) À ESCALA DE 1 MM; B) À ESCALA DE 100 MM	130
FIGURA 80 - AMOSTRA MARCADA COM PS, FS, VI, SS. A) À ESCALA DE 1 MM; B) À ESCALA DE 100 MM	130
FIGURA 81 - AMOSTRA MARCADA COM PS, FS, VI, SS. A) À ESCALA DE 1 MM; B) À ESCALA DE 100 MM	131
FIGURA 82 - ANÁLISE QUÍMICA DA AMOSTRA 63 NUMA ÁREA SEM MARCAÇÃO <i>LASER</i>	131
FIGURA 83 - ANÁLISE QUÍMICA DA AMOSTRA 63 NUMA ÁREA COM MARCAÇÃO <i>LASER</i>	131

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - FASES DO TRABALHO E CALENDARIZAÇÃO	32
TABELA 2 - NOMENCLATURA ADOTADA PARA AS AMOSTRAS DE MARCAÇÃO <i>LASER</i>	33
TABELA 3 - DADOS RELATIVOS À EMPRESA	34
TABELA 4 - CRONOLOGIA DA TECNOLOGIA <i>LASER</i>	39
TABELA 5 - CLASSIFICAÇÃO DA TAXA DE ABSORÇÃO PARA DIFERENTES COMPRIMENTOS DE ONDA <i>LASER</i> EM MATERIAIS COMUNS	47
TABELA 6 - DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE MARCAÇÃO <i>LASER</i>	56
TABELA 7 - PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE O DMC E O QR	63
TABELA 8 - CARACTERÍSTICAS AVALIADAS NUM DMC E NUM QR PARA GARANTIR A SUA QUALIDADE	64
TABELA 9 - ESTUDOS DO EFEITO DOS PARÂMETROS DE MARCAÇÃO <i>LASER</i> EM AMOSTRAS DE AÇO INOXIDÁVEL (AISI 304)	66
TABELA 10 - ESTUDO DO EFEITO DOS PARÂMETROS DE MARCAÇÃO <i>LASER</i> NA QUALIDADE OBTIDA NOS DMCS MARCADOS EM AMOSTRAS DE LIGA DE ALUMÍNIO (AA 6061)	70
TABELA 11 - ESTUDO DO EFEITO DOS PARÂMETROS DE MARCAÇÃO <i>LASER</i> NA QUALIDADE OBTIDA NOS DMCS MARCADOS EM AMOSTRAS DE AÇO AO CARBONO (AISI C1008/1010 E AISI C1095)	72
TABELA 12 – PROPRIEDADES DO MATERIAL UTILIZADO NO ESTUDO	86
TABELA 13 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA <i>LASER</i>	90
TABELA 14 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS LABORATÓRIOS	91
TABELA 15 - ETAPAS DE PREPARAÇÃO DOS TESTES	93
TABELA 16 - ETAPAS DAS ANÁLISES EM LABORATÓRIO	96
TABELA 17 - FATORES E NÍVEIS DE ESTUDO	98
TABELA 18 - ENSAIOS A REALIZAR NO EQUIPAMENTO	99
TABELA 19 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DO CC	109
TABELA 20 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DO CM	110
TABELA 21 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DO FPD	110
TABELA 22 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DO ANU	111
TABELA 23 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DO GNU	112
TABELA 24 - MELHORES CONDIÇÕES DE MARCAÇÃO <i>LASER</i> , PELO DOE FATORIAL	112
TABELA 25 - MELHORES PARÂMETROS DE MARCAÇÃO <i>LASER</i> , PELA ANÁLISE DE VARIÂNCIA	113
TABELA 26 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DO CC	119
TABELA 27 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DO CM	120
TABELA 28 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DO FPD	121
TABELA 29 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DO ANU	122
TABELA 30 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS VALORES DO GNU	122
TABELA 31 - MELHORES CONDIÇÕES DE MARCAÇÃO <i>LASER</i> , PELO DOE FATORIAL	123
TABELA 32 - MELHORES PARÂMETROS DE MARCAÇÃO <i>LASER</i> , PELA ANÁLISE DE VARIÂNCIA	123
TABELA 33 - COMPARAÇÃO DOS CÓDIGOS MARCADOS ANTES E DEPOIS DE DETERMINAR O MELHOR CONJUNTO DE PARÂMETROS, RECORRENDO AO DOE	124
TABELA 34 - CONCENTRAÇÃO MÁSSICA NORMALIZADA DE CADA ELEMENTO QUÍMICO PRESENTE NA AMOSTRA 63	132
TABELA 35 - CORRESPONDÊNCIA DAS ANÁLISES EM RELAÇÃO À QUALIDADE DOS CÓDIGOS OBTIDOS	133

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	XIII
GLOSSÁRIO DE TERMOS	XV
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
ÍNDICE DE TABELAS	XXI
1 INTRODUÇÃO.....	29
1.1 Contextualização	29
1.2 Objetivos	31
1.3 Metodologia utilizada no trabalho.....	32
1.4 Empresa de acolhimento	34
1.5 Estrutura da dissertação	35
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	39
2.1 A tecnologia <i>laser</i>	39
2.1.1 História e evolução	39
2.1.2 Princípio de funcionamento	43
2.1.3 Tipos de meio de ativação	46
2.1.4 Características da radiação <i>laser</i>	53
2.2 A marcação <i>laser</i>	54
2.2.1 Parâmetros do processo de marcação <i>laser</i>	58
2.2.2 Rastreabilidade através da marcação <i>laser</i>	61
2.2.3 Investigação na marcação <i>laser</i>	66
2.3 O Planeamento de Experiências (DoE).....	73
3 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA, DO PROCESSO E DO PROBLEMA	79
3.1 Grupo Bosch.....	79

3.1.1	História do Grupo Bosch	79
3.1.2	Missão, Visão e Valores	79
3.2	Bosch Car Multimédia Portugal, S.A.	81
3.2.1	Departamentos e Secções	81
3.2.2	Produtos e clientes	82
3.2.3	Processo de marcação <i>laser</i>	84
4	DESENVOLVIMENTO	89
4.1	Materiais	89
4.2	Meios utilizados	89
4.3	Métodos	92
4.4	Ensaio.....	97
4.5	Análise da qualidade dos códigos	101
4.6	Análise estatística das amostras DMC	102
4.6.1	Análise de Variância (ANOVA)	108
4.7	Análise estatística das amostras QR.....	113
4.7.1	Análise de Variância (ANOVA)	118
4.8	Análise da superfície marcada nas amostras	125
4.9	Correspondência das análises estatísticas com as análises laboratoriais.....	133
4.10	Comparação dos resultados obtidos com estudos semelhantes.....	135
5	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	139
5.1	Conclusões	139
5.2	Proposta de trabalhos futuros	142
6	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	145
7	ANEXOS	155
7.1	Anexo A - Ficha técnica do material.....	155
7.2	Anexo B - Composição do material	160
7.3	Anexo C - Classes do material Ultradur® (PBT)	163

7.4	Anexo D - Ficha técnica do equipamento de fonte <i>laser</i>	166
7.5	Anexo E - Imagens dos códigos analisados	168

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

1.2 Objetivos

1.3 Metodologia utilizada no trabalho

1.4 Empresa de acolhimento

1.5 Estrutura da dissertação

_Toc26127909

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda o enquadramento e âmbito da dissertação, em que se apresenta uma contextualização e motivação para a sua realização. Seguidamente, apresentam-se os objetivos gerais e específicos, assim como a metodologia adotada para os alcançar. Por fim, é descrita de forma sucinta a estrutura da dissertação.

1.1 Contextualização

A atual conjuntura internacional, na qual as empresas industriais operam, é caracterizada pela intensa competitividade, onde as novas tecnologias assumem um papel cada vez mais predominante [1]. Neste contexto, a melhoria contínua assume-se como uma estratégia que permite às empresas manter e melhorar a competitividade, fazendo uso do conhecimento, através do envolvimento dos colaboradores [2].

A melhoria contínua pode ser definida como pequenas mudanças incrementais que ocorrem nos processos produtivos ou práticas de trabalho, não exigindo grandes investimentos, cujos objetivos podem ser a melhoria da eficiência operacional e produtividade, qualidade, tempos de produção e demais resultados, nomeadamente no que diz respeito aos custos de produção [3].

O Grupo Bosch, líder mundial no fornecimento de tecnologia e serviços, que compreende a Robert Bosch GmbH e mais de 350 subsidiárias e empresas regionais em 60 países, rege-se segundo o lema de que “Não há nada que não possa ser melhorado”. Deste modo, as normalizações realizadas com sucesso são a base para melhorias futuras. É através da melhoria contínua e do evitar constante de desperdícios, que a Bosch procura atingir e assegurar processos controlados [4].

A Bosch Car Multimédia Portugal S.A., face ao cenário de elevada competitividade e disrupção do mercado automóvel, tem apostado numa estratégia de diversificação de produtos, procurando conceber produtos inovadores e com qualidade destacável. Deste modo, preocupada em ser uma referência nesta área de atuação, a empresa procura melhorar continuamente a qualidade dos seus serviços e processos, visando atingir a excelência nos seus produtos.

Segundo Barad [5], o Planeamento de Experiências (*Design of Experiments - DoE*) pode ser encarado como uma metodologia estatística sistemática e organizada, utilizada na análise de problemas de qualidade e na melhoria contínua do desempenho de processos produtivos, e é reconhecida como um meio eficaz de atingir a excelência na qualidade dos produtos e serviços de forma económica, pois podem ser obtidos resultados fiáveis através de um número relativamente pequeno de experiências ou observações.

O *Direct Part Marking (DPM)* é uma tecnologia de marcação de símbolos que tem gerado interesse nos últimos anos na indústria automóvel, aeroespacial, medicina, decoração,

pela marcação permanente e direta em peças, com fiabilidade [6,7]. O DPM pode ser realizado por vários processos, como por exemplo: *laser marking*, *dot peening*, e *chemical etching*. Entre estes métodos, a marcação a *laser* (*Laser Marking*) é a eleita para a escrita de símbolos em pequenas peças, por oferecer um conjunto de vantagens que fazem desta tecnologia de marcação uma das mais avançadas. Algumas das vantagens são o facto de se tratar de um processo: i) sem contacto, passível de ser automatizado; ii) com elevada velocidade, repetibilidade e flexibilidade; e iii) com reduzido impacto químico e térmico nas peças [7,8].

Um desafio existente no DPM, dada a dificuldade de criar contraste, é a marcação de símbolos em materiais metálicos com elevada refletividade e compósitos reforçados com fibras de vidro assegurando simultaneamente a resistência a ambientes agressivos, qualidade, repetibilidade e legibilidade por dispositivos de descodificação eletrónicos em linhas produtivas, os designados *scanners* [7,9]. Como estes dispositivos eletrónicos não são tão flexíveis como o olho humano, a qualidade da marcação *laser* deve ser cuidadosamente controlada de forma a garantir uma taxa de leitura consistente por parte dos mesmos, principalmente na indústria eletrónica, onde marcações precisas, bem visíveis e permanentes são críticas [10].

É no âmbito desta temática, e no Departamento de Engenharia de Industrialização (*Manufacturing Engineering - MFE*) da empresa Bosch Car Multimédia Portugal S.A., produtora de equipamentos eletrónicos para a indústria automóvel, que surge este projeto de investigação.

O estudo recai, mais concretamente, sobre o processo produtivo de marcação *laser*, com vista a investigar a influência dos parâmetros na qualidade do conteúdo marcado e, paralelamente, à melhoria do nível de qualidade do processo, adotando para tal a metodologia DoE - *Design of Experiments*.

Será dada ênfase à qualidade obtida no *Data Matrix Code (DMC)* e no *Quick Response code (QR)* em diferentes materiais, por se tratar de um elemento importante para o registo de dados de rastreabilidade dos produtos [9], que contém informações como: dados técnicos, número de série, data de fabrico, entre outros e que é lido pelo cliente nas linhas de montagem (BMW, Ducati, Suzuki, Kawasaki, Maserati, Daimler, PSA, Nissan, Fiat, Toyota, entre outros). Avaliar-se-á a conformidade com a norma *International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission (ISO/IEC) 29158:2020 "Information technology - Automatic identification and data capture techniques - Direct Part Mark (DPM) Quality Guideline"*, que especifica as metodologias para medir, avaliar e classificar as características dos códigos, com o intuito de aferir a qualidade da marcação. Serão avaliadas as seguintes características: i) *Decodability*; ii) *Cell Contrast (CC)*; iii) *Cell Modulation (CM)*; iv) *Fixed Pattern Damage (FPD)*; v) *Axial Non-Uniformity (ANU)*; e vi) *Grid Non-Uniformity (GNU)*.

O *know-how* adquirido relativamente aos parâmetros de marcação *laser*, o qual tem um efeito preponderante na qualidade da marca efetuada, permitirá reduzir o tempo despendido em melhorias por parte da equipa de engenharia de processo.

Este trabalho permitirá também aumentar a robustez do processo, melhorando simultaneamente o fluxo produtivo e reduzindo desperdícios inerentes a paragens por problemas de leitura do DMC e QR em processos internos intermédios, bem como produto sucitado.

Além disso, conseguir-se-ão diminuir as reclamações do cliente relativas a problemas de legibilidade dos códigos e melhorar a qualidade das marcações em geral, permitindo também adquirir informação para que, num futuro próximo, se melhorem Procedimentos e Regras para a Produção (*Process Rules for Production - PRP*) e Procedimentos e Regras para a Engenharia (*Process Rules for Engineering - PRE*), cumprindo desde o início da industrialização com os requisitos solicitados pelo cliente.

1.2 Objetivos

Pretende-se com este trabalho, obter o melhor conjunto de condições de marcação *laser*, proporcionando assim a melhor qualidade ao conteúdo marcado, cumprindo com os requisitos da norma ISO/IEC 29158:2020 imposta pelo cliente. Este trabalho permitirá ainda à empresa de acolhimento ter um conhecimento detalhado das melhores opções de marcação, evitando reclamações e desperdícios por paragens de produção para se efetuarem tentativas de redução da rejeição e produto sucitado com alterações sistemáticas de parâmetros. Para atingir estes objetivos, será necessário:

- Testar vários parâmetros de marcação *laser* a diferentes níveis num material de referência, utilizando uma metodologia de *Design of Experiments* (DoE) fatorial;
- Analisar as alterações superficiais com os diferentes conjuntos de parâmetros;
- Aferir e comparar o grau de qualidade do DMC e QR das várias amostras, correspondentes a diferentes conjuntos de parâmetros adotados, segundo a norma ISO/IEC 29158:2020, e recorrendo a um verificador próprio para o efeito;
- Avaliar a influência dos parâmetros de marcação na qualidade do DMC e QR;
- Melhorar o processo de marcação *laser*, encontrando o melhor conjunto de parâmetros para obter o melhor grau de qualidade no DMC e QR.

1.3 Metodologia utilizada no trabalho

A metodologia adotada neste estudo distribui-se pelas seguintes fases presentes na Tabela 1.

Tabela 1 - Fases do trabalho e calendarização

	2021	2022					
	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.
Fase 1							
Fase 2							
Fase 3							
Fase 4							
Fase 5							
Fase 6							
Fase 7							
Fase 8							
Fase 9							
Fase 10							
Fase 11							
Fase 12							

- ✓ **FASE 1:** Pesquisa e análise de literatura sobre marcação *laser*;
- ✓ **FASE 2:** Seleção de peças de um tipo de material;
- ✓ **FASE 3:** Seleção dos conjuntos de parâmetros a utilizar nos ensaios;
- ✓ **FASE 4:** Ensaios no equipamento de marcação *laser*, utilizando os conjuntos de parâmetros anteriormente selecionados;
- ✓ **FASE 5:** Atribuição da nomenclatura às amostras obtidas nos ensaios. As letras principais seguem as iniciais dos parâmetros de marcação, tal como: a inicial relativa ao parâmetro da potência da radiação corresponde à letra P, seguida de uma letra minúscula que varia entre i (inferior), n (nominal ou recomendada) ou s (superior). Na Tabela 2 encontram-se as diferentes nomenclaturas adotadas neste estudo.

Tabela 2 - Nomenclatura adotada para as amostras de marcação *laser*

Parâmetro de marcação	Nomenclatura	Parâmetro de marcação variável	Nomenclatura variável
Potência da Radiação (W)	P	Potência da Radiação Inferior	P_i
		Potência da Radiação Recomendada	P_n
		Potência da Radiação Superior	P_s
Frequência de Impulso (Hz)	F	Frequência de Impulso Inferior	F_i
		Frequência de Impulso Recomendada	F_n
		Frequência de Impulso Superior	F_s
Velocidade de Marcação (mm/s)	V	Velocidade de Marcação Inferior	V_i
		Velocidade de Marcação Recomendada	V_n
		Velocidade de marcação Superior	V_s
Sobreposição de Passagem (%)	S	Sobreposição de Passagem Inferior	S_i
		Sobreposição de Passagem Recomendada	S_n
		Sobreposição de Passagem Superior	S_s

- ✓ **FASE 6:** Determinação do grau de qualidade dos códigos das várias amostras, correspondentes a diferentes conjuntos de parâmetros selecionados, segundo a norma ISO/IEC 29158:2020 e recorrendo a um verificador;
- ✓ **FASE 7:** Organização e tratamento estatístico das medições obtidas, através da análise de um fatorial completo e ANOVA;
- ✓ **FASE 8:** Preparação das amostras para o SEM, nomeadamente através de um corte sobre a área polida e aplicação de um filme fino de ouro;
- ✓ **FASE 9:** Utilização do SEM para obtenção de imagens detalhadas da superfície marcada das amostras;
- ✓ **FASE 10:** Análise de todos os resultados obtidos, estabelecendo as devidas correspondências;
- ✓ **FASE 11:** Extração das conclusões;
- ✓ **FASE 12:** Redação da dissertação.

1.4 Empresa de acolhimento


O desenvolvimento deste projeto decorreu na Bosch Car Multimédia Portugal S.A., sediada em Braga desde 1990. A Bosch Car Multimédia Portugal S.A. encontra-se orientada para a produção de componentes eletrónicos para a indústria automóvel, oferecendo soluções inovadoras para a integração de funções de entretenimento, navegação, telemática e assistência à condução sob a princípio *Driving Convenience*, de forma a tornar a condução mais agradável, segura, ecológica e económica [11].

A Bosch Braga corresponde ao maior empregador privado da região, um dos maiores exportadores nacionais e à maior fábrica do Grupo Bosch no país e da divisão Car Multimédia do Grupo [11].

O facto de esta empresa possuir um quadro de funcionários vasto e altamente qualificado, uma cultura de melhoria contínua e se encontrar orientada para a Indústria 4.0 através da digitalização, equipamentos robotizados de excelente capacidade produtiva, entre outros, são fatores de distinção das demais empresas concorrentes na região.

Os dados principais da empresa podem ser consultados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados relativos à empresa

Nome da Empresa	Bosch Car Multimédia Portugal S.A.
Logótipo	 BOSCH
Área Fabril	200 000 m ²
Força Laboral	3 300 Colaboradores
Força Laboral (Administradores)	2 Administradores
Nº de Produtos Diferentes	814 Produtos
Horário de Funcionamento	24 h x 7 dias
Turnos	3 Turnos (00h - 8h, 8h - 16h e 16h - 00h)
Acessibilidades	Parque de estacionamento com 2000 lugares

A qualidade dos produtos e serviços Bosch é assegurada através de um conjunto de medidas que visam a produção sem defeitos (Figura 1) e o cumprimento de um conjunto de seis princípios da qualidade [12]:

- Satisfação das expectativas dos clientes, através da qualidade dos produtos e serviços;
- A qualidade e a melhoria contínua são da responsabilidade de todos;
- As diretivas, processos, sistemas e objetivos são baseados em requisitos de normas internacionais, expectativas do cliente, experiência e conhecimento;

- Qualidade significa fazer bem desde o início e “à primeira”, prevenindo desta forma a ocorrência de defeitos no final;
- Evitar falhas é mais importante do que eliminar defeitos;
- Os fornecedores assumem um papel fundamental na obtenção de qualidade nos produtos e serviços.

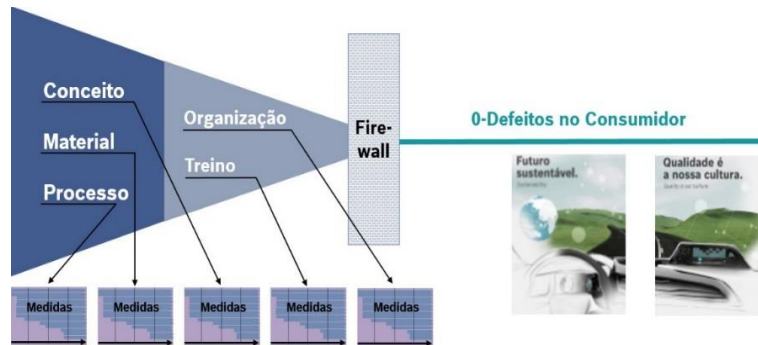


Figura 1 - Planeamento da qualidade [12]

1.5 Estrutura da dissertação

O presente documento encontra-se disposto em sete capítulos, nomeadamente: Introdução, Revisão bibliográfica, Caracterização da empresa, do processo e do problema, Desenvolvimento, Conclusões e propostas de trabalhos futuros, Bibliografia e outras fontes de informação e Anexos. Os trabalhos práticos desenvolvidos em torno da realização desta dissertação, assim como todas as análises laboratoriais, foram realizadas na empresa Bosch Car Multimédia Portugal, S.A. sediada em Braga, e com orientação tutorial realizada pelo Eng. José Brito. O período de realização dos trabalhos conducentes a esta dissertação ficou compreendido entre 01.11.2021 e 31.05.2022.

Este capítulo, tem como finalidade proporcionar ao leitor um contacto inicial com a problemática em estudo, a partir de uma sucinta descrição da mesma, por via da contextualização. Posteriormente, são descritos os objetivos do estudo desenvolvido e a motivação que encaminhou o autor a trabalhar nos objetivos previamente delineados. Ainda neste capítulo, é descrita a metodologia de trabalho adotada, é realizada uma pequena introdução à empresa de acolhimento e apresentada a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo, apresenta a revisão bibliográfica de uma forma ampla, desde os primórdios da tecnologia *laser*, até à criação da marcação *laser* e investigação atual relacionada com a influência dos parâmetros na qualidade da marcação obtida.

Seguidamente, no terceiro capítulo é apresentada e descrita a empresa, bem como o processo e o problema em que se debruça o projeto de dissertação para o Instituto Superior de Engenharia do Porto. Desta forma, retratam-se alguns dados históricos, e o modo como a empresa se encontra estruturada, especificamente em Portugal. Apresenta-se de forma mais detalhada a empresa Bosch Car Multimédia Portugal S.A.

no que diz respeito aos departamentos integrantes da empresa, com destaque acrescido para o Departamento de Engenharia de Industrialização, e os principais produtos e clientes finalizando com a descrição do processo e da problemática existente.

No quarto capítulo, apresenta-se a equipa envolvida no projeto, bem como o material de estudo e os métodos e meios utilizados para a sua concretização. Apresentam-se também os ensaios realizados, resultados obtidos e uma análise crítica aos mesmos.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões, as lições apreendidas para o futuro e enunciadas sugestões para dar seguimento ao trabalho desenvolvido nesta dissertação.

As referências bibliográficas encontram-se expostas após as conclusões, com vista a suportar cientificamente todo o estudo e para que o leitor possa aprofundar um determinado tema que considere relevante.

Por fim, poderão encontrar-se os anexos, essenciais para complementar a informação.

De acrescentar ainda que os diversos termos em inglês presentes na dissertação, foram dessa forma mencionados pelo facto de se tratar de características técnicas, documentos, procedimentos e locais físicos internamente designados dessa forma.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A tecnologia *laser*

2.2 A marcação *laser*

2.3 O Planejamento de Experiências (DoE)

_Toc26127909

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A tecnologia *laser*

2.1.1 História e evolução

Apresentam-se na Tabela 4, informações pertinentes de diversos autores relativamente à história da tecnologia *laser*. Abordam-se aspetos, por ordem cronológica, desde uma fase prematura em que a carência de informação e incerteza eram fatores predominantes, até à atualidade, que revela o préstimo e versatilidade desta tecnologia.

Tabela 4 - Cronologia da tecnologia *laser*

Autor	Ano	Acontecimento
[13,14,15]	1917	Através das leis de Max Planck e recorrendo ao teorema fundamental da teoria da mecânica do calor, Albert Einstein suspeitava que a luz conseguiria ser centralizada num feixe. Então, propôs que os fótons poderiam estimular a emissão de fótons idênticos a partir de átomos excitados, introduzindo desta forma o conceito de emissão estimulada. Publicou ainda, nesse ano um artigo sobre a teoria quântica da radiação, considerada como o conceito básico da tecnologia <i>laser</i> . A teoria de Einstein acabou por cair no esquecimento, devido às sucessivas guerras e períodos de instabilidade.
[13]	1928	Rudolf Ladenburg confirma a existência da emissão estimulada.
[16]	1930	Embora com dificuldades devido à falta de apoio e recursos, iniciaram-se experiências óticas e aquisição de conhecimento teórico importante para o progresso tecnológico.
[17]	1949	A divisão <i>Carbide and Carbon Chemical</i> , pertencente à empresa produtora de polímeros e produtos químicos Union Carbide, juntamente com a Universidade Nacional da Colômbia, disponibilizaram bolsas de pós-doutoramento para investigação da aplicação da espectroscopia de micro-ondas na química orgânica. Arthur Schawlow ingressa e começa desde então a trabalhar com

		Charles Townes, desenvolvendo em conjunto conhecimento na área.
[17]	1951	Terminada a bolsa de investigação, Schawlow aceita o cargo para trabalhar como físico nos Laboratórios Bell, interessando-se pela supercondutividade e ressonância nuclear. Charles Townes já possuía um histórico de avanços no ramo e escreve um livro juntamente com Schawlow sobre espectroscopia de micro-ondas.
[18]	1954	Charles Townes e o seu aluno James P. Gordon, apresentam a máquina derivada da ideia designada de MASER, ou seja, <i>Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> .
[15,19,20]	1960	Theodore Maiman apresenta, em maio, o primeiro dispositivo <i>laser</i> , o marco mais relevante da história desta tecnologia, projetado nos Laboratórios de Hughes, nos EUA. Este dispositivo possuía um meio ativo em cristal de rubi excitado por uma lâmpada de flash e emitia um feixe de <i>laser</i> de cor vermelha, com um comprimento de onda de 694 nm. Em dezembro, nos Laboratórios Bell, Ali Javan, William Bennett e Donald Herriott apresentam o <i>laser</i> de <i>Helium-Neon</i> (HeNe), o primeiro a gerar um feixe de luz contínuo a 1,15 μm .
[13]	1961	Elias Snitzer apresenta na American Optical o primeiro <i>laser Neodymium Glass</i> (Nd:Glass).
[19]	1962	Robert Hall apresenta o primeiro <i>laser</i> de díodo semiconductor, no laboratório de investigação da General Electric.
[13]	1964	Charles Koester e Elias Snitzer apresentam o primeiro amplificador de fibra utilizando uma bobina de fibra enrolada em formato de mola sobre uma lâmpada de flash, semelhante ao <i>design</i> do <i>laser</i> de rubi de Theodore Maiman. Kumar Patel desenvolve, nos Laboratórios Bell, aquele que viria a tornar-se o tipo de <i>laser</i> mais procurado da época: o primeiro <i>laser</i> CO ₂ , mais eficiente e económico do que o <i>laser</i> de rubi. Joseph Geusic e LeGrand Van Uitert desenvolvem o <i>laser Neodymium doped Yttrium Aluminium Garnet</i> (Nd:YAG), nos Laboratórios Bell.

[13]	1966	Charles Kao, juntamente com George Hockham em Harlow, Inglaterra, no Laboratório <i>Standard Telecommunication</i> , fazem uma descoberta que conduz à inovação no âmbito da fibra ótica, propondo a comunicação através de fibra ótica monomodo de baixa perda.
[13,19,21]	1970	Robert Maurer, Donald Keck e Peter Schultz constroem a primeira fibra ótica de baixa perda. Nikolai Basov, Danilychev e Popov desenvolvem o <i>laser excimer</i> . Bill Lawson, da empresa <i>Laser Machining Inc. (LMI)</i> , testa a viabilidade da marcação <i>laser</i> . A empresa <i>Laser Craft</i> desenvolve algumas tecnologias primitivas de marcação <i>laser</i> , com sistemas que exigem o uso de uma matriz na qual incide o <i>laser</i> para conferir a marcação. A empresa <i>Electrox</i> ganha destaque ao apresentar-se como pioneira no desenvolvimento e fabrico de um <i>laser</i> comercial de CO ₂ de fluxo axial rápido para marcação <i>laser</i> , fornecendo contributo para avanços no âmbito desta tecnologia.
[21]	1980	A tecnologia e os sistemas informáticos evoluem significativamente, permitindo que desde então os computadores fossem integrados nos sistemas de marcação <i>laser</i> .
[13,22]	1985	Duas décadas após Charles Koester e Elias Snitzer apresentarem o primeiro amplificador de fibra, a tecnologia começou a progredir rapidamente. David Payne da Universidade de Southampton, tentou dopar núcleos de fibra com elementos de terra rara, utilizando o Neodímio (Nd) para construir <i>lasers</i> de fibra. De seguida, Emmanuel Desurvire da Bell Labs, prova que o Érbio (Er) é um melhor elemento. Paralelamente, David Hanna da mesma universidade de David Payne, descobre que o Itérbio (Yb) é um elemento vantajoso para utilizar em <i>lasers</i> de fibra.
[22]	1990	Experiências no âmbito dos <i>lasers</i> de fibra demonstram que o Itérbio funciona muito bem, tornando-se daí em diante o elemento mais escolhido para a construção deste tipo de <i>lasers</i> .
[13]	2000	Deu-se um crescimento acentuado da tecnologia <i>laser</i> em aplicações industriais.

[13]	2008	Verificou-se uma grande mudança nos tipos de <i>lasers</i> industriais selecionados para atender às necessidades da indústria com a ascensão dos <i>lasers</i> de fibra de alta potência para aplicações industriais, em detrimento dos <i>lasers</i> de CO ₂ de alta potência. Os <i>lasers</i> de fibra de baixa potência substituíram os <i>lasers</i> de estado sólido para aplicações de marcação <i>laser</i> .
[23,24]	2009	Surgem estudos de marcação <i>laser</i> em superfícies curvas utilizando sistemas de marcação <i>laser</i> 2D de CO ₂ , onde é investigada a relação entre a distância focal de vários pontos da superfície curva e a profundidade e largura da marca resultante. Como resultado, desenvolveu-se uma técnica que compensa as variações de foco inerentes à superfície curva aplicando diferentes frequências de impulso para marcar diferentes partes da superfície.
[24]	2011	Criam-se modelos de marcação <i>laser</i> 3D aplicados a superfícies curvas e inclinadas. Os modelos baseiam-se na integração de um sistema de medição <i>laser</i> 3D num sistema de marcação <i>laser</i> , utilizando para tal a mesma fonte de <i>laser</i> e ótica para medição e marcação. Com o <i>laser</i> a operar em modo contínuo e a baixa potência efetua-se um mapeamento 3D da superfície da peça, e com o <i>laser</i> a operar em modo pulsado e com elevada potência de pico executa-se a marcação. Os dados adquiridos da superfície da peça em 3D são usados para determinar a trajetória do feixe de marcação <i>laser</i> , ou seja, nem a forma da peça nem sua orientação precisam de ser previamente conhecidas, desde que a superfície a marcar se situe na área de trabalho. Este facto, permite eliminar a necessidade de um posicionamento exato da peça antes de iniciar o processo, aumentando a sua flexibilidade.
[25]	2012	Lançam-se no mercado sistemas para marcação <i>laser</i> 3D. Os <i>lasers</i> de fibra representam 27% dos sistemas <i>laser</i> instalados mundialmente. Surgem <i>lasers</i> diodo de alta potência com melhor qualidade de feixe, aumentando a quota de mercado para este tipo de <i>laser</i> compacto e eficiente.

[26,27,28]	2021	Atualmente, os <i>lasers</i> de fibra representam 52% dos sistemas <i>laser</i> instalados mundialmente, os <i>lasers</i> de gás 24% e os <i>lasers</i> de estado sólido 24%. Avanços importantes estão a ser realizados na tecnologia <i>laser</i> de fibra, procurando torná-la mais eficiente, potente e acessível. Exemplo de aplicações mais recentes são o <i>laser cleaning</i> e <i>laser texturing</i> , que podem substituir tecnologias poluentes e contribuir para a preservação do meio ambiente. O <i>laser cleaning</i> permite, por exemplo, remover a ferrugem e a tinta das superfícies, e o <i>laser texturing</i> permite modificar a textura e a rugosidade das mesmas, podendo ser utilizado quer para alterar características superficiais, quer para fins estéticos.
------------	------	--

2.1.2 Princípio de funcionamento

A formação do feixe *laser* dá-se no gerador *laser* (Figura 2). O gerador *laser* contém os elementos imperativos para o desencadear do processo [29,30]:

- **Meio ativo** - Material que contém os átomos, moléculas ou iões responsáveis pela amplificação da luz pelo efeito de emissão estimulada. Geralmente, o componente que constitui o meio ativo concede o nome ao tipo de fonte *laser*, como por exemplo, o *laser* de HeNe, o *laser* de CO₂ e o *laser* de Nd:YAG.
- **Fonte de excitação** - Responsável pelo fornecimento de energia necessária para que as partículas do meio ativo sejam continuamente excitadas para níveis de energia superiores em número suficiente que permita produzir radiação *laser*. Ao processo de fornecimento de energia ao meio ativo dá-se o nome de mecanismo de bombeamento que, por sua vez, pode ser subdividido em: i) bombeamento óptico (geralmente utilizado em *lasers* cujo meio ativo é um sólido - recorre a uma descarga luminosa); ou ii) bombeamento electrónico (geralmente utilizado em *lasers* cujo meio ativo é um gás - recorre a uma descarga eléctrica).
- **Cavidade ótica ou ressonante** - É constituída por dois espelhos, planos ou curvos, alinhados entre si. Este arranjo de espelhos forma um oscilador que possibilita a manutenção de uma onda electromagnética estacionária. O espelho traseiro é totalmente reflector e o espelho de saída parcialmente reflector, o que permite que parte da energia seja transmitida para fora da cavidade ótica, constituindo o feixe *laser*.

A cavidade ótica desempenha um papel importante pois: i) possibilita a realimentação óptica e amplificação do fenómeno de emissão estimulada, o que permite que o meio ótico seja prolongado; ii) apenas os fotões que se propagam

paralelos ao eixo da cavidade contribuem para a amplificação, à medida que oscilam no meio ativo; iii) é responsável pelo elevado grau de colimação da radiação *laser*, uma vez que os fótons emitidos em direcções não paralelas ao eixo da cavidade são absorvidos.

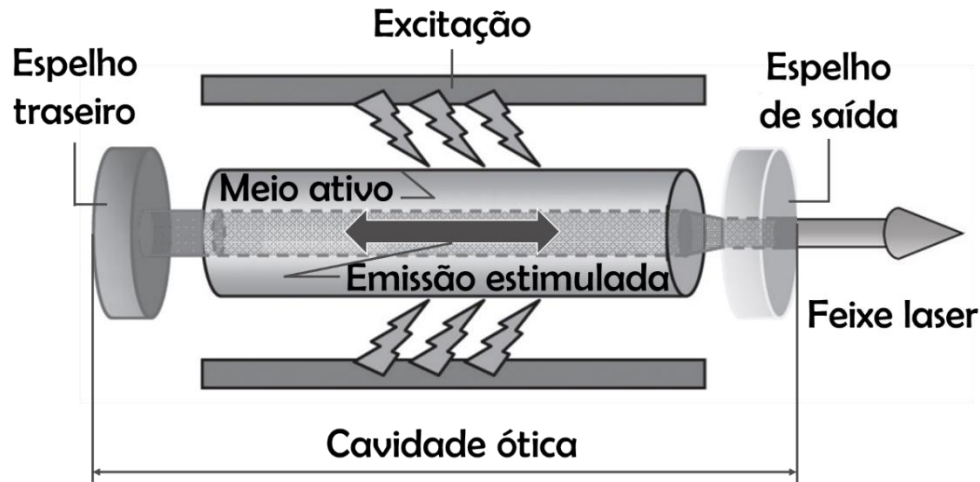


Figura 2 - Gerador *laser*. Adaptado de [29]

Sendo um átomo constituído por um núcleo rodeado de eletrões que giram à sua volta, descrevendo órbitas conhecidas e de energias definidas (designadas por níveis ou camadas eletrónicas), ao absorverem energia, os eletrões podem mover-se para órbitas mais externas e mais energéticas, dizendo-se que o átomo se encontra no estado excitado. Já nestas orbitas, os eletrões que se deslocaram para camadas mais energéticas tendem a regressar ao estado fundamental (de menor energia) através de um processo designado por emissão espontânea, emitindo uma quantidade de energia idêntica à energia absorvida [31]. Esta quantidade (*quantum*) de energia emitida ocorre sob a forma de radiação eletromagnética, ou de forma equivalente, sob a forma de um fóton com uma fase e direcção aleatória dada pela Equação 1 (Cálculo da quantidade de energia emitida quando os eletrões se deslocam das camadas mais energéticas para o estado fundamental) [32].

$$E_{21} = E_2 - E_1 \text{ [J]} \quad (1)$$

Por outro lado, se um eletrão se encontra no estado de energia E_2 e a sua direcção de decaimento é para E_1 mas, antes que este tenha chance de decaimento espontâneo, incidir sobre este um fóton cuja energia é aproximadamente $E_2 - E_1$ [J], existe uma forte probabilidade de este fóton causar o decaimento do eletrão, de tal forma que seja emitido um segundo fóton, com igual comprimento de onda, direcção e fase do fóton incidente, transformando-se desta forma a energia em luz transmitida por um processo designado por emissão estimulada.

Os fenómenos de absorção, emissão espontânea e emissão estimulada referidos anteriormente, encontram-se representados na Figura 3.

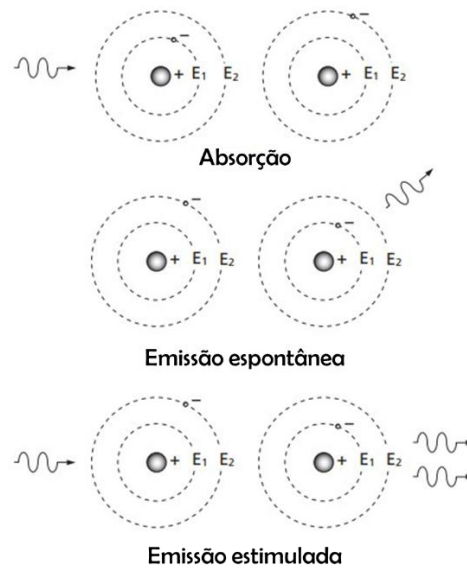


Figura 3 - Fenómenos de absorção, emissão espontânea e emissão estimulada. Adaptado de [32]

A emissão estimulada constitui a base para a geração da radiação *laser* e só ocorre através da existência de uma fonte de excitação que execute um bombeamento de fótons e que provoque uma situação de não-equilíbrio em que o número de partículas no estado excitado, E_2 , é superior ao número de partículas no estado fundamental, E_1 . Quando tal acontece, diz-se que existe inversão de população. Na situação de inversão de população, quando um elevado número de átomos se encontra no nível de energia superior, a influência de um único fóton com frequência apropriada, desencadeia, por emissão estimulada, uma avalanche de fótons em todas as direções. O conjunto de espelhos existente na direção do eixo de propagação do gerador *laser*, permite que se dê seguidamente uma amplificação, devido às múltiplas reflexões da luz que se dão na cavidade ótica [32].

Sem este conjunto de condições, o meio ativo iria absorver a energia emitida, distribuindo elétrons somente para o nível energético acima, sem emissão de qualquer partícula fundamental à geração do feixe *laser* [33].

2.1.3 Tipos de meio de ativação

O processamento de materiais com *laser* é possível graças à absorção da radiação *laser*, por parte da superfície dos mesmos. A absorção da radiação *laser* pelos diferentes materiais depende fortemente do comprimento de onda da radiação, facto que faz com que sejam aplicadas fontes *laser* com comprimentos de onda característicos em determinadas aplicações [34].

Os *lasers* classificam-se quanto ao meio ativo em três famílias: i) *lasers* de estado sólido; ii) *lasers* de estado gasoso; e iii) *lasers* de estado líquido (Figura 4) [35].

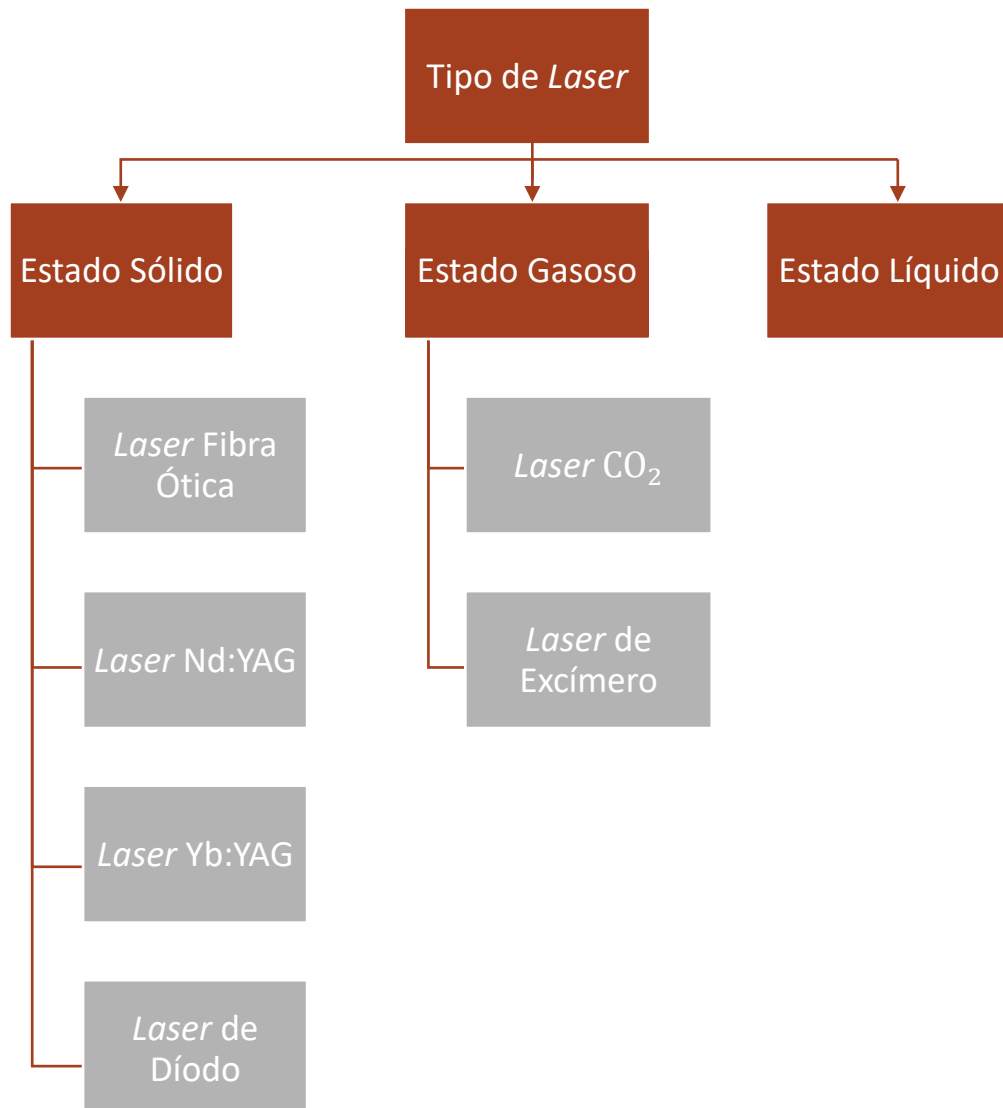


Figura 4 - Tipos de sistemas *laser*. Adaptado de [35].

A Tabela 5, classifica a taxa de absorção em Muito boa, Boa, Suficiente e Má para diferentes comprimentos de onda *laser* em vários materiais comuns, como metais, plásticos e outros [36].

Tabela 5 - Classificação da taxa de absorção para diferentes comprimentos de onda laser em materiais comuns

Material	<i>Laser</i> de Fibra Ótica Yb (1070 nm) e Nd:YVO4, Nd:YAG (1064 nm) - <i>Laser</i> infravermelho	<i>Laser</i> SHG (<i>Second-Harmonic</i> <i>Generation</i>) 532 nm - <i>Laser</i> verde	<i>Laser</i> de CO2 (10604 nm) - <i>Laser</i> infravermelho	
Metal	Aço	Muito boa	Boa	Má
	Alumínio	Muito boa	Boa	Má
	Aço Inoxidável	Muito boa	Boa	Má
	Cobre	Muito boa	Muito boa	Má
	Ouro	Boa	Muito boa	Má
	Prata	Suficiente	Muito boa	Má
	Plástico/ Resinas	ABS	Muito boa	Muito boa
PBT		Muito boa	Muito boa	Boa
POM		Muito boa	Muito boa	Boa
PC		Boa	Muito boa	Boa
PP		Boa	Muito boa	Boa
PVC		Muito boa	Muito boa	Muito boa
PET		Má	Má	Boa
Outros	Silicone	Boa	Muito boa	Má
	Cerâmica	Boa	Boa	Suficiente
	Papel	Suficiente	Suficiente	Muito boa
	Borracha	Suficiente	Suficiente	Muito boa
	Vidro	Má	Má	Muito boa
	Madeira	Suficiente	Suficiente	Má

Apesar de ser possível aplicar na marcação o *laser* de excímero, a baixa produtividade e elevado custo do equipamento faz com que este tipo fonte *laser* seja pouco aplicada no processo. As fontes *laser* mais populares em sistemas de marcação são: i) o *laser* de Nd:YAG, em que a excitação do meio ativo ocorre através da radiação emitida por uma lâmpada e o feixe *laser* gerado é da gama do infravermelho, um comprimento de onda de 1064 nm, absorvido facilmente por uma vasta gama de materiais; e ii) o *laser* de CO₂, cujo funcionamento detalhado se encontra descrito nas próximas páginas e que é economicamente vantajoso para marcar materiais que são absorvidos pelo comprimento de onda característico deste *laser*.

Apesar disso, em relação às restantes fontes *laser*, o *laser* de díodo e de fibra ótica têm sido aplicados cada vez mais na indústria em geral por apresentarem vantagens que serão debatidas posteriormente nesta revisão bibliográfica. A ênfase será dada, por isso, ao *laser* de CO₂, fibra ótica e díodo.

2.1.3.1 *Laser de CO₂*

Os *lasers* de estado gasoso estão disponíveis em quase toda a gama de potência (desde miliwatt a megawatt) e comprimentos de onda (UV-IR), podendo operar em modo contínuo ou pulsado. Este tipo de *laser* caracteriza-se por uma elevada complexidade de ajuste e manutenção, devido à quantidade de componentes que possui, e necessita geralmente de um sistema de refrigeração adequado ao tipo de meio de ativação, sendo por isso considerado o tipo de *laser* mais caro, o que constitui uma desvantagem [33].

O *laser* de CO₂ é um *laser* do tipo gasoso, na gama do infravermelho, com um comprimento de onda de 10604 nm, cujo feixe tem origem num tubo de vidro [37,38] (Figura 5), através da colisão entre um elevado fluxo de eletrões despoletado por uma fonte de excitação (descarga elétrica através de um eletrodo ou alimentação por radiação de frequência rádio) e moléculas de uma mistura de gases (CO₂, Hélio e Azoto) libertando, por sua vez, energia sob a forma de fotões [39]. De seguida, o feixe *laser* é conduzido por um sistema de espelhos até ao sistema de foco, local onde se dá a sua colimação.

A maioria dos *lasers* de CO₂ acima de 10 kW possui uma eficiência relativamente baixa, cerca de 10 a 15%, apresentando um grau de absorção elevado para materiais naturais e sintéticos, especialmente para polímeros e compósitos de matriz polimérica [40]. Devido à combinação única de comprimento de onda, potência e pureza espectral, o *laser* CO₂ tem sido utilizado em aplicações emergentes na área de processamento de materiais (corte *laser*, marcação *laser*, entre outros), tecnologia de deteção e alcance da luz (*Light Detection And Ranging - LiDAR*), assistência à tecnologia de visão térmica e aplicações médicas ou terapêuticas [41].

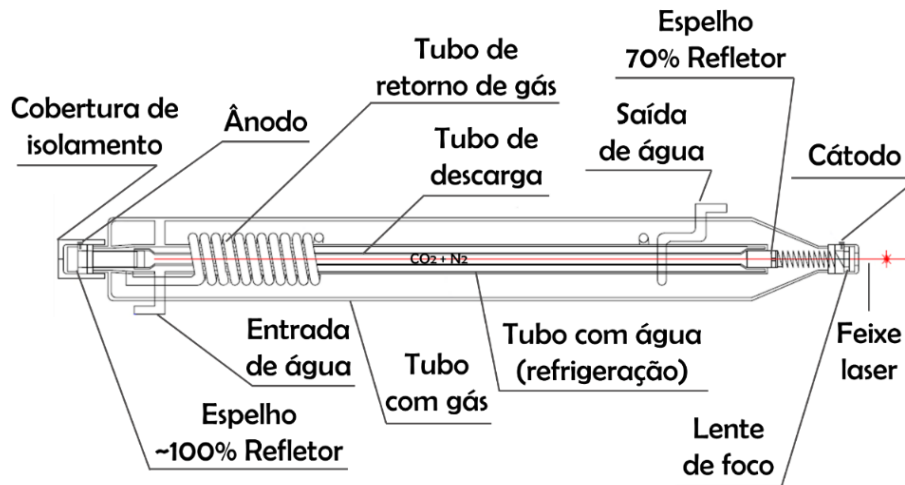


Figura 5 - Tubo de vidro da mistura de gases num *laser* CO₂. Adaptado de [37]

Na Figura 6, pode-se observar a constituição de um *laser* CO₂ na sua totalidade, cujos componentes são tipicamente:

- **O gerador *laser*** - Local onde é gerado o feixe *laser* (representado previamente na Figura 5). É constituído por um tubo de vidro composto por uma mistura de gases que devem estar em constante circulação através do tubo de retorno de gás, devido ao decaimento resultante da desagregação das moléculas com a estimulação contínua. No gerador, a radiação é conduzida por um sistema de dois espelhos (sendo um 100% refletor e o outro apenas 70% refletor), permitindo assim estimular a radiação e simultaneamente emitir de forma contínua parte desta para o sistema de foco;
- **Os espelhos e lentes** - Para guiar e focar o feixe *laser*, respetivamente;
- **O fole** - Construído em material elastomérico, para apresentar boas propriedades de flexibilidade e resistência e, conseqüentemente, absorver as cargas provenientes do movimento da cabeça de foco. Integra uma proteção de gás seco ou Azoto para afastar do feixe *laser* pós e partículas que provocam a sua distorção, prejudicando a qualidade do mesmo.

Relativamente ao modo de funcionamento, o *laser* CO₂ pode operar em dois modos distintos [33,42,43]:

- **Modo contínuo** - A potência de saída é constante, em regime permanente, resultado da aplicação de uma descarga de corrente elétrica constante sobre o meio ativo;
- **Modo pulsado** - Através de um modulador externo (o *laser* é emitido de forma contínua, mas tem um interruptor externo que só deixa sair a luz da cavidade ótica durante curtos intervalos de tempo), ou através de um modulador interno (que liga e desliga o próprio processo de emissão *laser*). Existem quatro métodos para obter modulação interna da luz *laser*, os quais, por sua vez, dão origem a quatro tipos de emissão de luz pulsada: i) *laser* pulsado relaxado; ii) *Q-switching*;

iii) *Cavity dumping*; iv) *Mode-locking*. Os parâmetros de funcionamento da fonte de excitação do *laser* em regime pulsado ditam a duração e frequência de impulso. Os valores característicos de duração de impulso encontram-se compreendidos entre 100 ms e 10 ms, com uma frequência de impulso compreendida entre 1 Hz e 100 Hz.

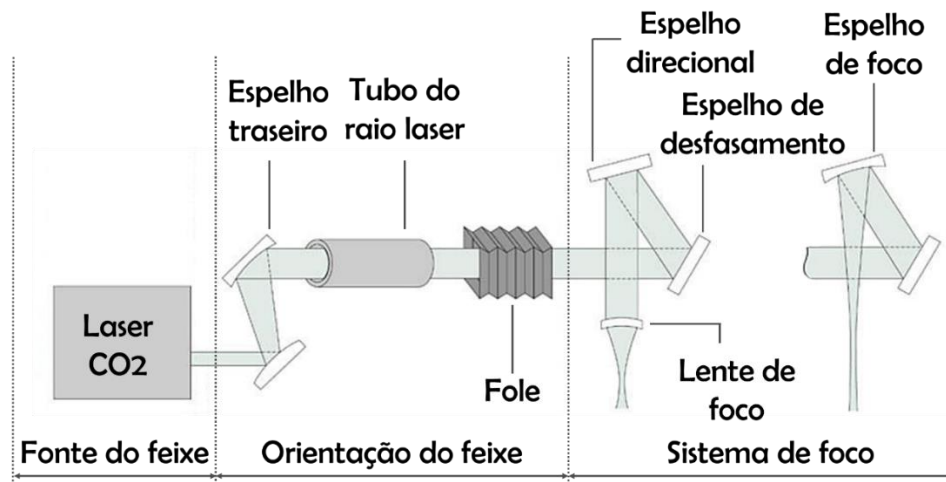


Figura 6 - Constituição típica de um sistema *laser* CO₂. Adaptado de [44]

2.1.3.2 Laser de Fibra Ótica

Os *lasers* de fibra ótica são a entrada mais recente na área da tecnologia *laser* de estado sólido [45], tendo aumentando rapidamente a sua penetração em todos os setores do campo industrial, médico e de aplicação de energia direcionada [46]. Desta forma, ultimamente e para bastantes aplicações, os *lasers* baseados em tecnologia de fibra ótica competem diretamente com os *lasers* de estado sólido convencionais e de estado gasoso sendo, em muitos casos, já considerados como candidatos ideais à sua substituição [38,47]. O tipo de *laser* de fibra mais comum tem a designação Yb (Itérbio): Fibra. Este tipo de *laser* emite um feixe com comprimento de onda na gama do infravermelho de 1062 - 1064 nm. O facto de os *lasers* de fibra ótica serem extremamente compactos e estáveis ao longo do tempo, possuírem elevada eficiência, qualidade de feixe, fiabilidade e reduzida necessidade de manutenção e ajuste, são algumas das principais vantagens dos *lasers* de fibra ótica quando comparados com tecnologias convencionais de estado sólido ou gasoso [48].

O *laser* de fibra ótica baseia-se num meio de ganho constituído por um segmento de fibra ótica, e numa cavidade ótica formada por espelhos dicróicos acoplados ao topo da fibra (Figura 7), ou espelhos integrados em fibra, como por exemplo redes de Bragg em fibra ótica ou espelhos em anel [49].

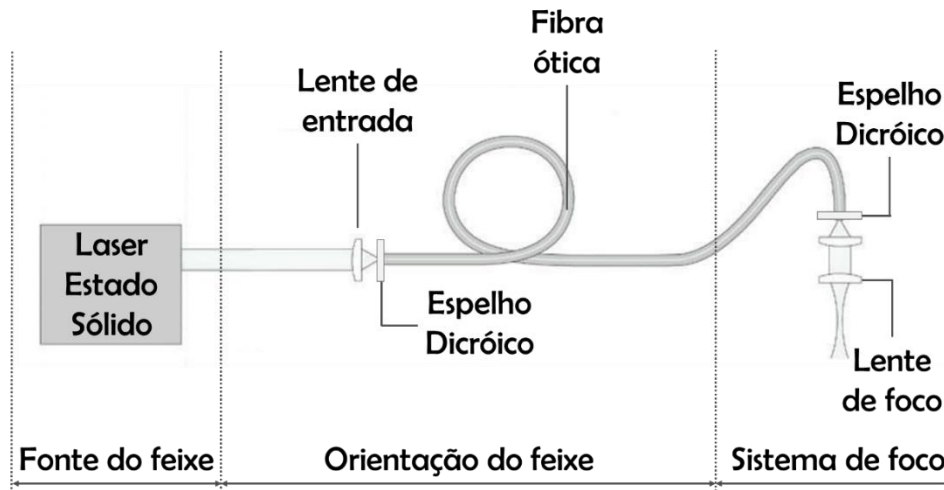


Figura 7 - Constituição típica de um sistema *laser* de fibra ótica. Adaptado de [44]

Apesar de alguns dos constituintes deste tipo de *laser* serem comuns e terem as mesmas funções dos sistemas de *laser* CO₂ (caso da lente de entrada e lente de foco, do fole e dos espelhos, embora estes últimos em muito menor quantidade), a forma como é conduzido o feixe *laser* é distinta. No *laser* de fibra ótica, o feixe é conduzido por um cabo de fibra ótica (constituído por várias fibras) e não são necessários tantos espelhos como nos *lasers* CO₂, facto que permite uma diminuição de perdas e complexidade do sistema [50]. Além disso, o *laser* de fibra ótica não contém o tubo de vidro de mistura de gases, pois não é necessário nenhum gás para a formação do feixe *laser*. Neste tipo de *laser*, o feixe é gerado através da excitação de cristais e da projeção sobre a fibra ótica, onde se dão múltiplas reflexões. A fibra ótica (Figura 8) é constituída por uma região central designada de núcleo (dopado com iões de terras raras), envolvido por uma camada chamada bainha ou casca em sílica ou material polimérico e um revestimento de proteção em plástico [51]. O núcleo tem um índice de refração maior do que o revestimento para permitir a reflexão total no comprimento de onda da radiação do feixe *laser*, limitando assim a propagação dos raios do *laser* no interior do núcleo [52]. As fibras óticas podem ser do tipo [52]: i) monomodo, constituídas por núcleo e revestimento (que pode ser simples ou duplo); e ii) multimodo, constituídas por diversas camadas e índices de refração diferentes que ajudam na propagação da luz.

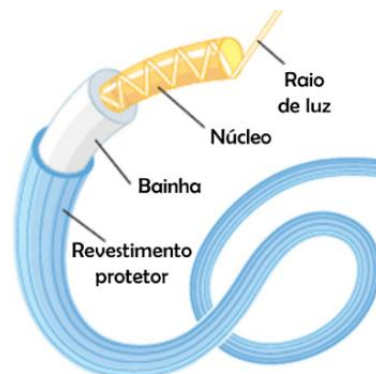


Figura 8 - Fibra ótica. Adaptado de [53]

2.1.3.3 Laser de Díodo

Um *laser* de díodo (LD), também designado por *laser* de junção, é um *laser* semiconductor bombeado eletricamente, no qual o meio ativo onde é gerado o feixe *laser* é formado por uma junção p - n de um díodo semiconductor semelhante a um díodo emissor de luz. Note-se que são semelhantes e não iguais, pois o díodo *laser* tem um nível limite de corrente acima do qual a emissão do feixe *laser* de luz coerente ocorre e abaixo do qual o díodo se comporta essencialmente como um LED, emitindo luz incoerente. O LD é um *laser* do tipo sólido, na gama do infravermelho, com um comprimento de onda entre 375 - 2000 nm, dependendo do tipo de díodo utilizado. O facto de os *lasers* de díodo serem os mais eficientes, possuírem um elevado tempo de vida (cerca de 100.000 horas de trabalho), reduzida necessidade de manutenção, boa absorção por parte dos materiais metálicos e possibilidade de integração de fibra ótica para a condução do feixe *laser*, faz com que este tipo de sistema *laser* seja bastante fiável. No entanto, tal como os restantes sistemas *laser*, também possui pontos negativos. Destacam-se a fraca coerência do feixe *laser* e baixa absorção por parte dos materiais não metálicos.

A constituição básica de um díodo *laser* encontra-se na Figura 9. Os díodos *laser* são, geralmente, compostos por três camadas. As camadas periféricas são constituídas por materiais semicondutores como o Arsenieto de Gálio (GaAs) dopado com alumínio, silício ou selénio para produzir camadas p e n , enquanto que a camada ativa, central, não é dopada. O comprimento da junção p - n tem uma relação precisa com o comprimento de onda da luz emitida. Existe uma superfície altamente refletora numa extremidade da junção p - n e uma superfície parcialmente refletora na outra extremidade, formando uma cavidade ressonante para os fótons. As ligações externas permitem a conexão ao ânodo e ao cátodo.

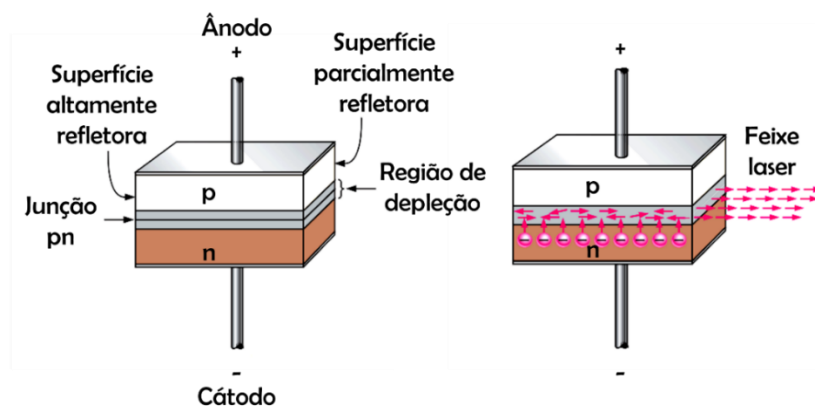


Figura 9 - Constituição básica de um díodo *laser*. Adaptado de [54]

O díodo *laser* é polarizado por uma fonte de tensão externa. Inicialmente, e devido à diferente dopagem das duas zonas, existirá uma corrente de lacunas (corrente de difusão) da zona p para a zona n , e uma corrente também do mesmo tipo (corrente de difusão), de eletrões da zona n para a zona p . Desta forma, passa a haver uma região junto à junção sem cargas livres, a qual é designada por Região de depleção.

À medida que os elétrons se movem através da junção $p-n$, a recombinação ocorre exatamente como num diodo comum, ou seja, os elétrons deslocam-se para as lacunas para se recombinarem, e os fótons são libertados. Um fóton libertado pode atingir um átomo, causando a libertação de outro fóton. Com o aumento da corrente direta, mais elétrons entram na região de depleção e fazem com que mais fótons sejam emitidos. Alguns dos fótons que flutuam aleatoriamente na região de depleção atingem as superfícies refletoras que se encontram perpendicularmente. Os fótons refletidos movem-se ao longo da região de depleção, atingindo átomos e libertando mais fótons, devido ao efeito de avalanche. O movimento de ida e volta dos fótons aumenta à medida que se geram mais fótons (efeito de avalanche), até que se forma um feixe *laser* muito intenso, através dos fótons que atravessam a extremidade parcialmente refratária da junção $p-n$. Cada fóton produzido neste processo é idêntico aos outros fótons em nível de energia, relação de fase e frequência. Desta forma, através do diodo *laser*, é emitido um único comprimento de onda de luz intensa.

Os diodos *laser*, dependendo do tipo de sistema, podem ser acoplados diretamente no interior de cabeças galvanométricas sob a forma de módulos, ou então num sistema externo junto da fonte de alimentação, em que é necessária a integração de fibra ótica para a condução do feixe *laser*, Figura 10.

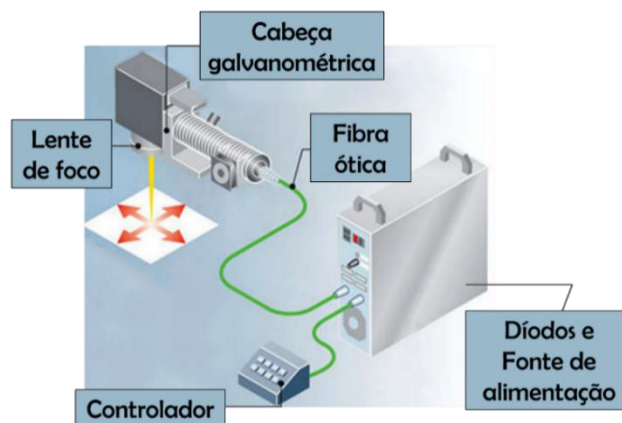


Figura 10 - Constituição típica de um sistema *laser* de diodo. Adaptado de [55]

2.1.4 Características da radiação *laser*

O termo *LASER* provém do acrónimo inglês *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, em português, amplificação da luz por emissão estimulada de radiação, que sintetiza o processo de emissão de radiação *laser*. A radiação *laser* possui características particulares e únicas que a tornam útil para uma vastíssima variedade de aplicações. Estas características resultam, principalmente, da forma como a radiação é gerada no emissor *laser*, sendo estas a [42]:

- **Monocromaticidade** - A radiação emitida por um *laser* é monocromática, ou seja, apresenta uma só cor ou um intervalo estreito de comprimentos de onda

(a largura de banda de comprimentos de onda pode ser maior ou menor consoante o tipo de *laser*);

- **Direccionalidade ou colimação** - A radiação possui elevado grau de colimação, ou seja, por outras palavras, os raios que a compõem são, praticamente, paralelos entre si;
- **Coerência temporal ou coerência de fase** - As ondas eletromagnéticas produzidas pelo *laser* estão todas em fase, ou seja, têm a mesma frequência (coerência temporal) e a mesma direção de propagação (coerência espacial).

Assim sendo, na radiação *laser* forma-se um feixe amplificado de radiação eletromagnética que é constituído por fótons com o mesmo comprimento de onda, a mesma frequência, estado energético e direção única de propagação.

2.2 A marcação *laser*

Segundo Qiu, Bao e Lu [56], a marcação *laser* trata-se essencialmente de um processo térmico que emprega um feixe concentrado de alta intensidade de luz para criar uma marca contrastante na superfície de um determinado substrato. Esta marca pode ser efetuada tanto por remoção de material, como por mudança de cor da camada superficial do material através de aquecimento localizado [57]. O conteúdo a marcar pode variar desde um simples código alfanumérico, um DMC para indicar dados técnicos, números de série, data de fabrico, validade, etc. até símbolos funcionais, certificações e logotipos da empresa [58], possibilitando a aplicação em diversas áreas, tais como por exemplo: i) indústria automóvel - marcação de código matriz para registo de números de peça e de logotipos em painéis de instrumentos, faróis, para-choques, marcação dos tamanhos dos furos dos cilindros nos blocos de motor [56]; ii) indústria eletrónica - marcação em interruptores, bobinas, condensadores, pastilhas de silício e placas de circuito impresso [10]; iii) medicina - marcação de articulações artificiais [56].

Entre as várias vantagens deste processo pode-se destacar o facto de [58,59,60]:

- Permitir a aplicação em produtos com diversas geometrias;
- Possibilitar elevado grau de automação e combinação de produção em massa com rápida personalização e programação;
- Proporcionar a integração numa linha de montagem de forma segura para os operadores;
- Não utilizar pré-tratamento e tintas nocivas para o ambiente;
- Conferir alta reprodutibilidade e velocidade de processamento sem desgaste de ferramentas;
- Possibilitar o uso de comprimentos de onda mais curtos, que são mais bem absorvidos pelo material; e
- Permitir reduzir a Zona Termicamente Afetada (ZTA).

Deste modo, o processo fornece uma combinação excelente de velocidade, permanência e versatilidade, sendo portanto competitivo para aplicações em que anteriormente apenas o *Electrical Discharge Machining (EDM)* era opção [61]. Na Figura 11, encontra-se representado o processo de marcação *laser* com uma determinada velocidade de marcação (V) e a interação da radiação com o material, sendo a energia *laser* recebida (E_c), energia *laser* refletida (E_r) e a energia *laser* transmitida (E_t).

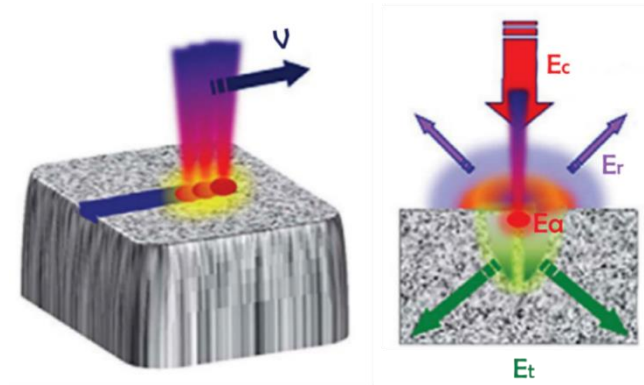


Figura 11 - Processo de marcação *laser* e a interação da radiação com o material. Adaptado de [46]

Segundo a informação que se encontra na literatura sobre marcação a *laser*, é evidente que o conhecimento relacionado com a interação física da luz com os materiais, durante o processo, desempenha um papel importante para a produção de marcações com qualidade em diferentes tipos de substratos [62]. Os fatores ditos importantes e que são frequentemente investigados são os parâmetros do *laser*, por exemplo, frequência de impulso, potência e velocidade de marcação e também as propriedades do substrato, como por exemplo, a difusibilidade térmica. São vários os métodos que se podem utilizar na marcação *laser*. Dependendo do tipo de material que se pretende marcar e dos parâmetros utilizados, a superfície pode ser marcada com diferentes métodos. No caso dos metais, a marcação *laser* pode ser realizada através dos métodos: *i) engraving; ii) annealing; e iii) coating removal* (Figura 12) [61,63,64].

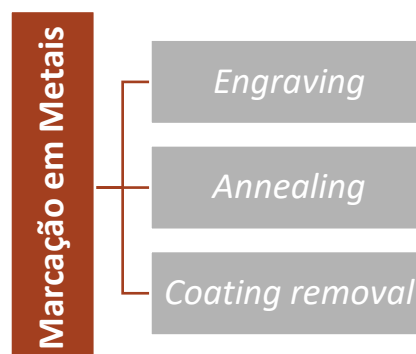
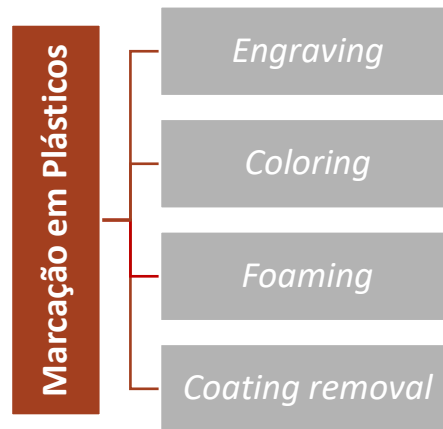


Figura 12 - Métodos de marcação *laser* em metais

Já nos plásticos, a marcação *laser* pode ser realizada através dos métodos: *i) engraving; ii) coloring; iii) foaming; e iv) coating removal* (Figura 13) [61,63,64].

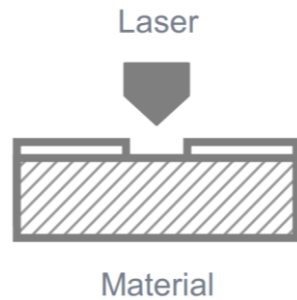
Figura 13 - Métodos de marcação *laser* em plásticos

Na Tabela 6, encontra-se uma breve descrição dos métodos de marcação *laser* que podem ser utilizados [61,63,64].

Tabela 6 - Descrição dos métodos de marcação *laser*

Método de Marcação	Ilustração	Descrição
Engraving		Utiliza-se em metais e plásticos, quando se pretende marcar o material através da criação de sulcos. A penetração pode apresentar vários milímetros de profundidade, dependendo do número de passagens a realizar. Este método exige que a densidade de energia seja suficientemente alta para elevar a temperatura da superfície do material bastante acima do ponto de fusão, fazendo com que ocorra fusão ou evaporação.
Annealing		Emprega-se apenas nos metais, quando se pretende marcar uma superfície sem agressão, através da criação de uma camada de óxido por aquecimento. Esta camada (marcação a preto) é facilmente identificável devido ao elevado contraste que apresenta. Este método requer que o <i>laser</i> se encontre afastado da distância focal e se utilizem baixas velocidades de marcação, sendo adequado para metais em que é possível criar uma camada de

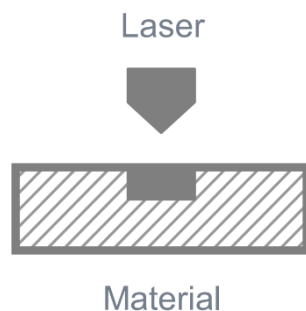
Coating removal



óxido de cor diferente, tal como o aço e o titânio. O alumínio e o crómio não são adequados para marcação por recozimento (nestes casos a camada de óxido formada é transparente).

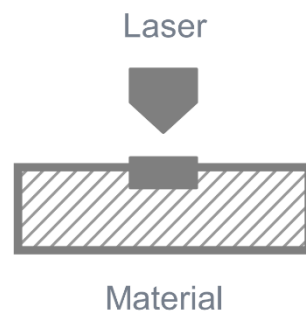
Aplica-se em metais e plásticos quando, em determinadas aplicações, se pretende obter elevado contraste entre a área marcada e a restante superfície do material através da remoção da camada de revestimento, como por exemplo, na marcação de alumínio anodizado. Este método requer a utilização de uma elevada velocidade de marcação.

Coloring



Emprega-se apenas nos plásticos, quando se pretende marcar uma superfície sem agressão, através da mudança de cor. Este método requer que a densidade de energia seja tal que a temperatura da superfície do material permaneça abaixo do ponto de fusão, fazendo com que os materiais possam sofrer alterações ao nível da composição química e estruturas moleculares devido às reações químicas que se desenrolam quando expostos à radiação *laser* com um determinado comprimento de onda. Deste modo, dependendo da composição química do material, poderão ser obtidas diferentes tonalidades.

Foaming



Utiliza-se apenas em plásticos (geralmente escuros), quando se pretende fundir e formar bolhas semelhantes a espuma na superfície. As bolhas de gás geradas refletem a luz difusa e fazem com que a marcação se revele mais clara nessas zonas comparativamente às zonas que não tenham sido atingidas pelo feixe *laser*.

2.2.1 Parâmetros do processo de marcação *laser*

Durante a marcação *laser* ocorre uma interação complexa na superfície do material, podendo-se obter diferentes aparências, dependendo dos parâmetros do *laser* definidos e do tipo de material que se pretende marcar [56].

Nos últimos anos, têm sido impostos requisitos exigentes a este processo em termos de qualidade, flexibilidade, velocidade e custo de produção [58]. O estudo dos vários parâmetros do processo em determinados materiais permite marcar conteúdo com elevada qualidade e legibilidade, e também expandir a aplicação desta tecnologia para indústrias que apliquem materiais idênticos.

Na marcação *laser*, destacam-se os seguintes parâmetros [61]:

- Tipo de feixe *laser* (pulsado ou contínuo, comprimento de onda e potência da radiação);
- Frequência de impulso;
- Intensidade de corrente;
- Ótica de focalização e diâmetro do feixe;
- Posição do ponto focal;
- Velocidade de marcação;
- Modo de preenchimento;
- Espaçamento entre linhas.

Num processo de marcação *laser*, há que ter também em consideração as variáveis que afetam o processo e que estão relacionadas com o tipo de material de base e de revestimento. Incluem-se ainda as propriedades físicas, químicas e mecânicas do material. Os parâmetros mais característicos da marcação *laser* apresentam-se descritos seguidamente.

Comprimento de onda

Trata-se de um parâmetro não regulável, na medida em que os valores do comprimento de onda variam consoante o tipo de sistema *laser* escolhido, estando diretamente relacionados com a forma como é excitada a fonte de luz *laser*.

Potência da radiação

É responsável por determinar a densidade de energia introduzida no material. A potência da radiação tem de ser determinada tendo em conta as características do material, minimizando a ZTA. Na marcação *laser*, a potência é normalmente expressa em % da potência total que será utilizada para a marcação.

Frequência de impulso

Corresponde ao número de oscilações produzidas pelos campos elétrico e magnético durante o intervalo de um segundo. A gama de frequência de impulso típica na marcação *laser* situa-se entre 10 e 50 kHz.

Intensidade de corrente

Parâmetro que determina a quantidade de carga elétrica que atravessa a secção reta do condutor por unidade de tempo. A corrente diz-se muito intensa se, por unidade de tempo, na secção reta do condutor, atravessar uma grande quantidade de carga elétrica. A gama de intensidade de corrente típica na marcação *laser* situa-se entre 15 e 30 A.

Diâmetro do feixe *laser*

O diâmetro do feixe *laser* está fundamentalmente relacionado com o sistema ótico do equipamento e varia de acordo com o tipo.

Distância focal

Corresponde à distância existente entre o centro ótico de uma lente e o ponto focal ou superfície que se pretende marcar. O intervalo de focagem corresponde à distância acima e abaixo do ponto focal, em que é possível obter uma marcação nítida. O ponto focal corresponde ao ponto em que o feixe *laser* se encontra focado para a obtenção da marcação mais nítida possível. Estes elementos encontram-se representados na (Figura 14).

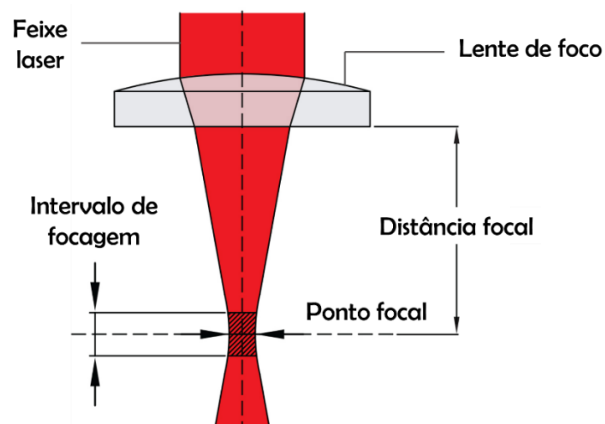


Figura 14 - Esquema exemplificativo da distância focal, intervalo de focagem e ponto focal. Adaptado de [65]

Velocidade de marcação

Este parâmetro corresponde à velocidade de avanço do *laser* (ponto focal) na superfície do material que se pretende marcar. Nas velocidades mais baixas, o *laser* interage por mais tempo com o material, modificando mais o seu aspeto. Nas mais altas, como o material fica menos tempo exposto, modifica-se menos. No entanto, o grau de modificação está relacionado também com os restantes parâmetros, que trabalham em paralelo para atingir um determinado objetivo.

Preenchimento

O preenchimento define o percurso que o *laser* percorrerá para preencher uma determinada marcação (Figura 15). O tempo de ciclo e a qualidade são afetados por este parâmetro, de acordo com o tipo de preenchimento adotado. O preenchimento bidirecional é aquele que se traduz numa velocidade de marcação mais eficiente. Ainda no preenchimento, é possível parametrizar o espaçamento e ângulo das linhas.

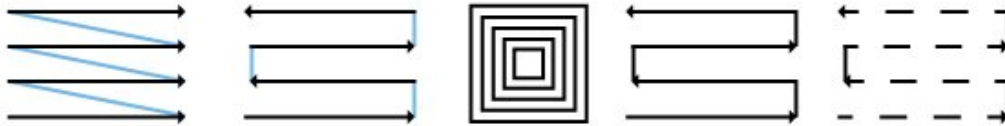


Figura 15 - Exemplos de tipos de preenchimento [66]

Espaçamento entre linhas

Este parâmetro corresponde à distância entre as linhas de preenchimento de uma determinada área (Figura 16). Quanto menor o espaçamento, maior o tempo de marcação, pois mais linhas terão de ser marcadas para preencher todo o espaço.

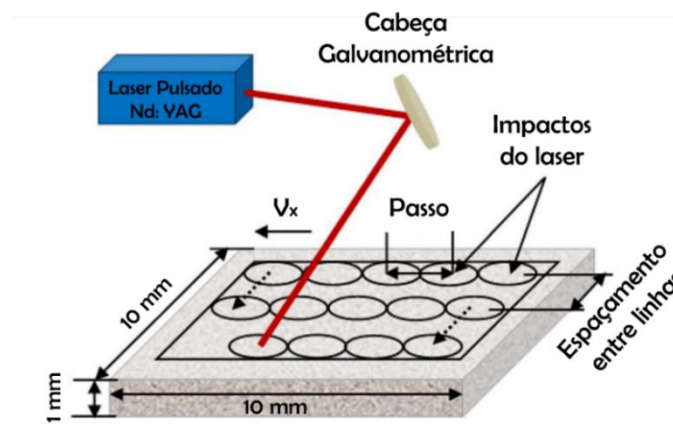


Figura 16 - Representação esquemática do processo de marcação *laser*. Adaptado de [67]

Um fator importante relacionado com o espaçamento entre linhas e que afeta a qualidade da marcação é a sobreposição, pelo seu efeito significativo na rugosidade conferida à superfície e profundidade atingida na marcação [68]. Existem dois tipos de sobreposição (Figura 17), que podem ocorrer em simultâneo caso o espaçamento entre linhas (d) seja inferior ou igual ao diâmetro do *spot* (D), normalmente expressos em %: i) sobreposição de impulso (*pulse overlap* - η_p) dado pela Equação 2; e ii) sobreposição de passagem (*scan overlap* - η_s) dado pela Equação 3 [7].

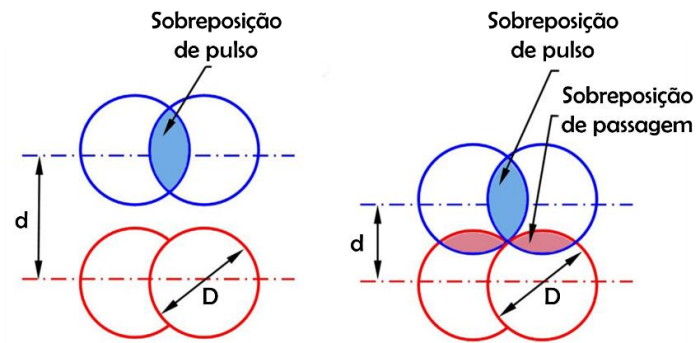


Figura 17 - Tipos de sobreposição na marcação *laser*. À esquerda $d > D$ e à direita $d \leq D$. Adaptado de [7]

$$\eta_p = \left[1 - \frac{v}{fD} \right] \times 100\% \quad (2)$$

$$\eta_s = \left[1 - \frac{d}{D} \right] \times 100\% \quad (3)$$

De acordo com as Equações 2 e 3, quando D se mantém constante, qualquer alteração na frequência de impulso (f), velocidade de marcação (v) e espaçamento entre linhas influenciará diretamente a percentagem de sobreposição. Além disso, quanto maior for a sobreposição, maior o tempo de interação do *laser* com o material e maior a quantidade de energia absorvida pelo mesmo, resultando numa modificação mais acentuada do seu aspeto [7].

2.2.2 Rastreabilidade através da marcação *laser*

A rastreabilidade, ou seja, a capacidade de acompanhar um componente e consultar o seu histórico ao longo do seu ciclo de vida, tem desempenhado um papel cada vez mais importante na indústria, nomeadamente com a Indústria 4.0 e a crescente digitalização. A elevada complexidade das cadeias de abastecimento, existência de contrafação e de *recalls* de produtos, têm tornado a rastreabilidade cada vez mais importante [69,70].

Para efeitos de rastreabilidade podem ser utilizados, por exemplo, códigos 1D e 2D com diversas informações, tais como o número de peça e de série, o lote, a data de fabrico, entre outros [10]. Estes códigos podem ser impressos em etiquetas e colados nas peças ou então, marcados diretamente nas mesmas com o *laser*, proporcionando uma marcação permanente, legível e uma rastreabilidade eficaz [70].

Em cenário produtivo, efetuando a leitura destes códigos ao longo da cadeia de abastecimento é possível analisar informação sobre o material e processos de fabrico utilizados, resultados de inspeções realizadas, entre outros, permitindo armazenar esta informação em sistema informático [69].

Os códigos 1D correspondem aos códigos de barras convencionais e têm vindo a ser substituídos nas mais diversas áreas pelos códigos 2D, assim designados por serem capazes de armazenar informação na direção horizontal e vertical. As vantagens que mais se destacam nos códigos 2D, são a elevada capacidade de correção de erros na

descodificação mesmo apresentando danos e lacunas e a elevada capacidade de armazenamento de informação, face à área ocupada [10].

Na Figura 18, encontram-se os principais tipos de códigos e normas ISO que determinam a sua qualidade de acordo com o tipo de substrato em que se apresentam.

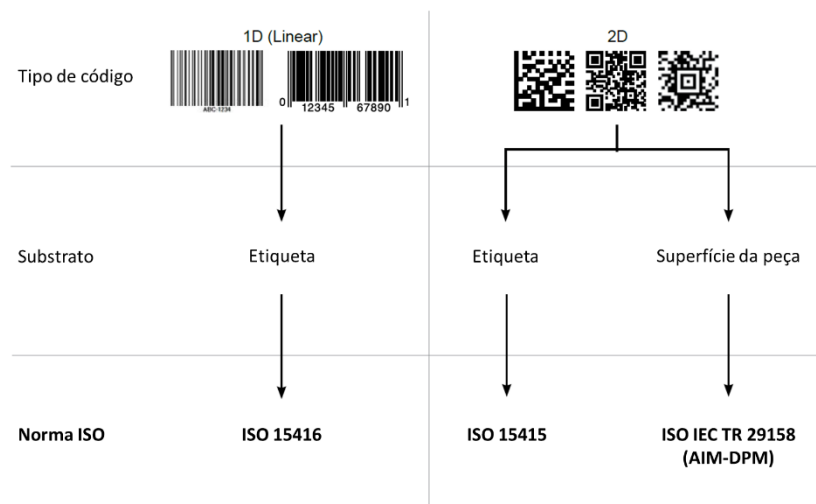


Figura 18 - Principais tipos de códigos e normas ISO que determinam a sua qualidade. Adaptado de [71]

Os DMCs e os QRs são exemplos de códigos 2D, cuja estrutura é constituída por vários elementos (Figura 19), que permitem distinguir os códigos entre si e também distinguir um código entre outros elementos numa superfície [72,73]. Os elementos constituintes são:

- **Finder Pattern** - utilizado pelos *scanners* para determinar a posição do código;
- **Timing Pattern** - sequência alternada entre preto e branco, disposta nas direções horizontal e vertical, utilizada para determinar o tamanho de um módulo, o número de linhas e colunas e a possível distorção do código;
- **Alignment Pattern** - elemento presente em QRs de versão 2 ou superior, em que a quantidade de informação é maior e, portanto, são necessários elementos adicionais para corrigir a distorção;
- **Module (cell)** - elemento que armazena os dados codificados. A codificação de dados em sistema binário, 0 e 1 é convertida em módulos (células) brancos e pretos, respetivamente;
- **Quiet Zone** - corresponde à margem ao redor dos códigos para redução da interferência de elementos circundantes na leitura efetuada pelo *scanner*. No caso do DMC a margem deve ser maior ou igual a 3 módulos e no caso do QR deve ser maior ou igual a 4 módulos.

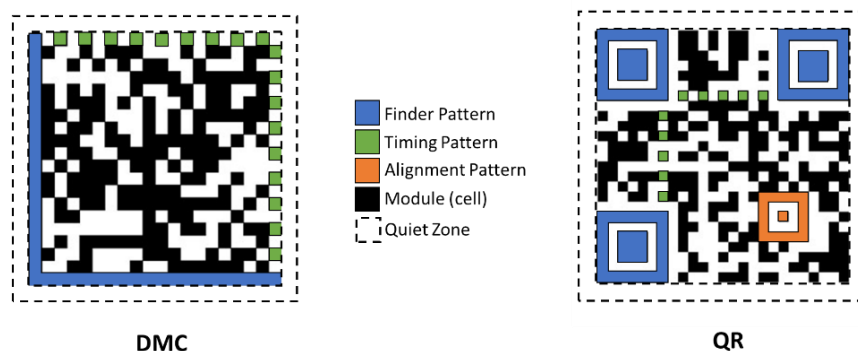


Figura 19 - Elementos constituintes do DMC e do QR. Adaptado de [72]

Na Tabela 7, encontram-se as principais diferenças entre o DMC e o QR [72,74,75].




Tabela 7 - Principais diferenças entre o DMC e o QR

	DMC	QR
Capacidade máxima de armazenamento de caracteres	Numéricos: 3116 Alfanuméricos: 2335 Kanji/Kana: não compatível	Numéricos: 7089 Alfanuméricos: 4296 Kanji/Kana: 1817
Tamanho	Mínimo: 10×10 módulos Máximo: 144×144 módulos	Mínimo: 21×21 módulos Máximo: 177×177 módulos
Nível de correção de erros (Error Correction Level - ECL) - percentagem de dano que o código pode ter sem se tornar ilegível	O nível é determinado automaticamente pelo tamanho do código e pela capacidade de armazenamento restante <ul style="list-style-type: none"> ECL varia entre 25-33% 	O nível é selecionado manualmente <p>Níveis:</p> <ul style="list-style-type: none"> L (<i>Low</i>): ECL = 7% M (<i>Medium</i>): ECL = 15% Q (<i>Quartile</i>): ECL = 25% H (<i>High</i>): ECL = 30% <p>Quanto mais elevado o nível, menor a capacidade de armazenamento devido à redundância criada no código para permitir a leitura</p>
Aplicação	Ideal para aplicações industriais com o objetivo de efetuar a rastreabilidade da cadeia de abastecimento	Ideal para fins comerciais, com o intuito de armazenar informações adicionais relativas aos produtos e para promover a interação com o consumidor

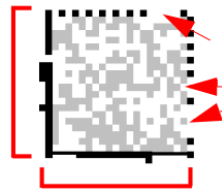
Tal como referido anteriormente na Figura 18, a norma ISO que determina a qualidade de códigos marcados diretamente na superfície das peças é a ISO/IEC 29158:2020. A preocupação com o cumprimento desta norma para obtenção de uma classe de qualidade tão elevada quanto possível para os códigos, permite que o processo de marcação seja ajustado, de modo que a legibilidade seja garantida e se obtenham códigos mais robustos mesmo quando expostos a ambientes agrestes.

Na Tabela 8 encontram-se as características avaliadas num DMC e num QR para garantir a sua qualidade [76,77].

Tabela 8 - Características avaliadas num DMC e num QR para garantir a sua qualidade

Parâmetro	Ilustração	Descrição
<i>Decodability</i>		Refere-se à capacidade de um código ser decodificado por um algoritmo de decodificação, como, por exemplo, um <i>scanner</i> . Este parâmetro pode ser classificado apenas através de duas classes: i) classe A, significa que o código é facilmente legível; ii) classe F, significa que o código é ilegível. Os códigos com maior rugosidade superficial e contraste são decodificados mais facilmente [7].
<i>Cell Contrast (CC)</i>		O contraste dos códigos é avaliado pela diferença de valor de refletância entre os elementos claros e escuros do código, e entre a <i>quiet zone</i> e os elementos periféricos (Figura 19). Ou seja, todos os <i>pixels</i> da imagem capturada ao código que se pretende verificar são, em primeira instância, classificados de acordo com os seus valores de refletância, para selecionar os 10% mais escuros e os 10% mais claros. A diferença entre as médias aritméticas desses dois grupos define o contraste do código. No exemplo ao lado encontra-se um código com baixo contraste. Os elementos escuros e os elementos claros têm um valor muito próximo, o que prejudica a legibilidade.
<i>Cell Modulation (CM)</i>		A modulação refere-se à uniformidade de reflexão dos elementos claros e escuros do código. No exemplo ao lado os valores claro/escuro de alguns dos elementos são inconsistentes.

Fixed Pattern Damage (FPD)



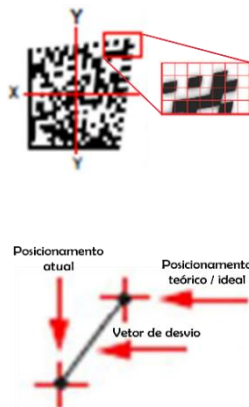
Este parâmetro refere-se ao dano presente no *Finder Pattern*, *Timing Pattern*, *Alignment Pattern* e na *Quiet Zone* (Figura 19). Observe-se, no exemplo ao lado, as lacunas existentes no *Timing Pattern* e no *Finder Pattern*.

Axial Non-Uniformity (ANU)



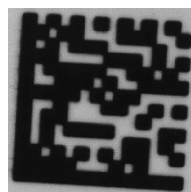
Este parâmetro indica que não existe uniformidade entre os eixos X e Y do código. Neste exemplo, a dimensão segundo o eixo Y é claramente superior à do eixo X, o que indica que o código resultante do processo de marcação tem dimensões Y dos módulos individuais maiores do que as dimensões segundo o eixo X. Essa inconsistência das dimensões X e Y indica, normalmente, que existe movimento do objeto enquanto este está a ser marcado.

Grid Non-Uniformity (GNU)



O *Grid Non-Uniformity*, está relacionado com o desvio de posicionamento de um módulo relativamente à posição teórica, considerada como ideal. A classe obtida neste parâmetro, é resultado do cálculo do desvio de posicionamento máximo detetado nos módulos atuais face ao posicionamento dos módulos teóricos.

Print Growth (PG)



Overprint



Underprint

Este parâmetro, que apenas serve de referência, refere-se ao desvio (maior ou menor) do tamanho real de um elemento em relação ao tamanho ideal, devido a problemas de marcação. Devido à má seleção de parâmetros, na marcação de um código, pode existir elevada sobreposição entre passagens, ocorrendo o designado *Overprint*, ou, por oposição, o designado *Underprint*.

Cada uma das características mencionadas na Tabela 8 é avaliada com uma classe, que pode ser: A (4.0), B (3.0), C (2.0), D (1.0) ou F (0.0), de acordo com o critério presente na

norma ISO/IEC 29158:2020, correspondendo: A, à melhor classificação, e F, à pior classificação. A classe de qualidade global atribuída ao código, corresponde à mínima classificação de todas estas características avaliadas.

2.2.3 Investigação na marcação *laser*

Existem estudos realizados no âmbito da marcação *laser* relativos à influência dos parâmetros no processo de marcação. Apresentam-se, de seguida, estudos em aço inoxidável (AISI 304) (Tabela 9).

Tabela 9 - Estudos do efeito dos parâmetros de marcação *laser* em amostras de aço inoxidável (AISI 304)

Estudos em Aço Inoxidável (AISI 304)	
Nome do artigo	<i>A study on the laser marking process of stainless steel</i>
Autor	[60]
Tipo de <i>laser</i>	<i>Laser</i> de Nd: YAG
Resumo	<p>Neste trabalho, os autores, pretenderam efetuar um estudo sobre a influência da frequência de impulso na qualidade da marcação através da análise da largura, profundidade (penetração) e contraste da marcação, recorrendo para tal ao <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>, a um profilometro e a um dispositivo de recolha de imagens próprio para o efeito, respetivamente. Por conveniência, nas amostras foram marcadas linhas retas com valores distintos de frequência de impulso.</p> <p>Através do <i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS)</i>, os autores, observaram que a presença de oxigénio nas marcações era mais elevada para valores superiores de frequência de impulso, devido ao aumento da oxidação do material.</p> <p>Concluiu-se que a frequência de impulso tem um efeito significativo na qualidade da marcação, pois o seu aumento traduz-se numa menor evaporação de material e uma oxidação mais significativa, fazendo com que o contraste aumente.</p>
Parâmetro testado	Resultados
Frequência de impulso	O aumento da frequência de impulso traduz-se num aumento da profundidade de marcação, existindo uma profundidade máxima de marcação quando a frequência de impulso é de cerca de 3

kHz, mantendo-se a largura de marcação praticamente constante para diferentes frequências de impulso.

Por outro lado, a profundidade da marcação diminui com o aumento da frequência do impulso para valores superiores a 3 kHz, fenómeno explicado pelos autores como sendo causado pela alteração da potência de pico e da potência média do *laser* com a alteração da frequência de impulso. A potência de pico diminui e a potência média aumenta com o aumento da frequência de impulso. Isto é, devido ao aumento da potência média com o aumento da frequência de impulso, o volume de material evaporado aumenta e a profundidade de marcação aumenta também. No entanto, quando a frequência de impulso é alta, o material não evapora completamente e parte dele fica no estado fundido, porque o pico de potência não é alto o suficiente para fazê-lo evaporar, fazendo com que a profundidade de marcação diminua por esta razão.

O contraste da marcação melhora com o aumento da frequência de impulso, e é máximo para 8 kHz, pois o seu aumento traduz-se numa menor evaporação de material e uma oxidação mais significativa.

Nome do artigo	<i>Analysis the effect of laser engraving process for surface roughness measurement on stainless steel (304)</i>
Autor	[78]
Tipo de <i>laser</i>	<i>Laser</i> de Nd: YAG
Resumo	Neste trabalho, os autores, pretenderam estabelecer uma relação entre os parâmetros de marcação <i>laser</i> e a rugosidade superficial obtida em substratos com 1,5 mm de espessura, através de um DoE fatorial completo usando matriz ortogonal L ₂₇ . Concluiu-se que a rugosidade superficial diminui com o aumento da frequência de impulso e com o aumento da velocidade de marcação, sendo máxima para uma frequência de impulso de 20 kHz, velocidade de marcação de 100 mm/s e um número de passagens igual a 10. Por outro lado, a rugosidade superficial é mínima, quando a frequência de impulso e a velocidade de marcação são máximas, ou seja, 80 kHz e 500 mm/s, respetivamente. Segundo os autores, isto acontece porque para uma dada velocidade de marcação, quanto mais elevada for a frequência de impulso, maior é a interação do feixe

laser com o material por unidade de tempo, e o resultado disso é uma diminuição da ondulação da superfície e, conseqüentemente, da rugosidade.

Parâmetro testado	Resultados
Frequência de impulso	Mostrou-se que aumentando a frequência de impulso a rugosidade média (R_a) é menor, sendo mínima para uma frequência de impulso de 80 kHz e máxima para uma frequência de impulso de 20 kHz.
Velocidade de marcação	No mesmo estudo, a rugosidade média (R_a) é máxima para uma velocidade de marcação de 100 mm/s e diminui de forma acentuada com o aumento da velocidade de marcação até 300 mm/s, mantendo-se estável de seguida até 500 mm/s.
Número de passagens	Ainda neste estudo, a rugosidade média (R_a) é máxima para 10 passagens e diminui de forma acentuada até 15 passagens, voltando a aumentar ligeiramente de seguida, até 20 passagens.
Nome do artigo	<i>AISI 304 stainless steel marking by a Q-switched diode pumped Nd:YAG laser</i>
Autor	[59]
Tipo de <i>laser</i>	<i>Laser</i> de Nd: YAG
Resumo	<p>Neste trabalho, os autores, pretenderam estabelecer uma relação entre os parâmetros de marcação <i>laser</i> e o contraste obtido na marcação em amostras com 2 mm de espessura previamente polidas com uma lixa P1200 e limpas com acetona para eliminar partículas e resíduos de óleo. A avaliação do contraste foi efetuada através de um dispositivo de recolha de imagens próprio para o efeito. Através de um perfilometro (modelo CLI 2000 3D da Talysurf[®]) e também do SEM (modelo S440 da Leica-Cambridge) e do EDS, foram também realizadas análises aprofundadas aos substratos. A ZTA foi avaliada através do <i>software TalyMap Universal Surface Analysis</i>.</p> <p>Além disso, para avaliar o efeito da intensidade de corrente e da frequência de impulso na potência média do <i>laser</i>, os autores utilizaram um medidor de potência (modelo F150A-SH da OPHIR[®]).</p> <p>As experiências foram realizadas à temperatura ambiente, com uma gama de intensidade de corrente compreendida entre 35 e</p>

45 A, velocidade de marcação igual a 50, 100 e 200 mm/s e alterando a frequência do impulso no intervalo de 1 a 30 kHz.

Em cada experiência foi marcada uma linha reta com 50 mm de comprimento, através de uma única passagem.

Verificou-se que a rugosidade superficial e a oxidação aumentam em função da frequência de impulso, resultando na melhoria do contraste, até um valor característico (entre 4 e 6 kHz), diminuindo posteriormente. Por estes motivos, os autores referem que, apesar da visibilidade da marcação ser dependente do sistema *laser* utilizado, se o objetivo é obter boa visibilidade na marcação, devem ser usadas frequências de impulso relativamente baixas (entre 4 e 6 kHz) e potências médias.

Por fim, os autores construíram um modelo empírico, e a partir dele, foram traçadas as melhores condições de processamento para se obter uma boa visibilidade da marcação, tendo em consideração as restrições operacionais do sistema *laser* utilizado.

Parâmetro testado	Resultados
Intensidade de corrente	Verificou-se que a intensidade de corrente por si só, afeta de forma insignificante a largura da marcação. Além disso, comprovou-se que o aumento da intensidade de corrente resulta principalmente em dois efeitos no contraste obtido na marcação: i) diminuição do contraste; ii) necessidade de aumento da frequência de impulso para se obter melhor contraste.
Velocidade de marcação	No mesmo estudo, verificou-se que a velocidade de marcação, por si só, afeta insignificativamente a largura da marcação. Além disso, para uma determinada frequência de impulso, o decréscimo da velocidade traduz-se no aumento do número de estrias criadas por unidade de comprimento marcado e obtenção de uma superfície preta.
Potência média	Ainda neste estudo, confirmou-se que para uma determinada intensidade de corrente, a potência média da radiação aumenta a uma taxa decrescente com o aumento da frequência de impulso. Além disso, para uma determinada frequência de impulso, a potência média da radiação é tanto maior, quanto maior for a intensidade de corrente. Concluiu-se que, se o

objetivo consiste em obter boa visibilidade da marcação, devem ser usadas potências médias.

Frequência de impulso

Foi observado que o aumento da frequência de impulso para determinada velocidade de marcação, implica o aparecimento de um maior número de estrias e, conseqüentemente, uma maior sobreposição e um maior número de pontos por unidade de comprimento marcado. Comprovou-se também que, com o aumento da frequência de impulso até cerca de 15 kHz, ocorre uma redução de cerca de 25% na largura da marcação, permanecendo posteriormente constante e inferior ao diâmetro do *spot*. Além disso, constatou-se que a frequência de impulso crítica para a rugosidade máxima (compreendida entre 4 e 8 kHz) é relativamente insensível à intensidade de corrente e à velocidade de marcação. Verificou-se que, para uma dada frequência de impulso, são alcançados valores maiores de R_t , se forem usadas velocidades de marcação mais baixas e intensidades de corrente mais altas. Por fim, concluiu-se que, se o objetivo consiste em obter boa visibilidade da marcação, devem ser usadas frequências de impulso relativamente baixas.

Existem, também, estudos mais direcionados para a influência dos parâmetros de marcação *laser* na qualidade obtida nos códigos marcados (Tabela 10 e Tabela 11). Na Tabela 10, encontra-se um estudo realizado em amostras de liga de alumínio (AA 6061).

Tabela 10 - Estudo do efeito dos parâmetros de marcação *laser* na qualidade obtida nos DMCs marcados em amostras de Liga de Alumínio (AA 6061)

Estudo em Liga de Alumínio (AA 6061)

Nome do artigo	<i>Experimental investigation and mathematical modeling of laser marking two-dimensional barcodes on surfaces of aluminum alloy</i>
Autor	[7]
Tipo de <i>laser</i>	<i>Laser</i> de Nd: YAG
Resumo	Neste trabalho, os autores, pretenderam estabelecer uma relação entre os parâmetros de marcação <i>laser</i> e a rugosidade superficial obtida em DMCs através: i) do método de fator único; e ii) de um DoE com uma matriz ortogonal L_{25} . No DoE, os dados experimentais da rugosidade superficial foram convertidos em índice Sinal/Ruído de R_a (<i>Signal/Noise Ratio - S/N_{Ra}</i>) para DMCs brancos (classe D) e pretos (classe B) com o tipo de relação: o

valor-alvo é o melhor. Mostrou-se que a rugosidade superficial melhora a qualidade do DMC e que os resultados obtidos pelo modelo matemático estão fortemente correlacionados com os resultados experimentais, demonstrando a eficácia do modelo.

Parâmetro testado	Resultados
Frequência de impulso	<p>Mostrou-se que com o aumento da frequência de impulso, maior é o índice S/N_{Ra}, sendo, portanto, mínimo para uma frequência de impulso de 1 kHz e máximo para uma frequência de impulso de 5 kHz no caso dos DMCs pretos, verificando-se o oposto nos DMCs brancos. Deste modo, a frequência de impulso ótima para DMCs pretos é 5 kHz e para DMCs brancos é 1 kHz.</p>
Intensidade de corrente	<p>Provou-se que o índice S/N_{Ra} aumenta progressivamente com o aumento da intensidade de corrente até atingir um máximo aos 14 A, diminuindo posteriormente, no caso dos DMCs pretos. Já no caso dos DMCs brancos, o índice S/N_{Ra} é máximo para uma intensidade de corrente igual a 10 A, diminuindo progressivamente com o aumento de intensidade. Assim, a intensidade de corrente ótima para DMCs pretos é 14 A e para DMCs brancos é 10 A.</p>
Velocidade de marcação	<p>Demonstrou-se que o índice S/N_{Ra} é máximo quando a velocidade de marcação é igual a 10 mm/s e que este índice diminui progressivamente com o aumento da velocidade de marcação no caso dos DMCs pretos, verificando-se o oposto nos DMCs brancos.</p> <p>Deste modo, a velocidade de marcação ótima para DMCs pretos é 10 mm/s e para DMCs brancos é 100 mm/s.</p>
Espaçamento entre linhas	<p>Provou-se que o índice S/N_{Ra} é máximo quando o espaçamento entre linhas é igual a 0,03 mm e que este índice diminui progressivamente com o aumento do espaçamento entre linhas no caso dos DMCs pretos, verificando-se o oposto nos DMCs brancos.</p> <p>Deste modo, o espaçamento entre linhas ótimo para DMCs pretos é 0,03 mm e para DMCs brancos é 0,105 mm.</p>

Na Tabela 11, encontra-se um estudo realizado em amostras de aço ao carbono (AISI C1008/1010 - Baixo teor em carbono e AISI C1095 - Elevado teor em carbono), em que se procurou, tal como mencionado anteriormente, avaliar a influência dos parâmetros de marcação *laser* na qualidade obtida nos DMCs marcados.

Tabela 11 - Estudo do efeito dos parâmetros de marcação *laser* na qualidade obtida nos DMCs marcados em amostras de aço ao carbono (AISI C1008/1010 e AISI C1095)

Estudo em Aço ao Carbono (AISI C1008/1010 e AISI C1095)	
Nome do artigo	<i>Laser direct-part marking of data matrix symbols on carbon steel substrates</i>
Autor	[9]
Tipo de <i>laser</i>	Lasers de Nd: YAG
Resumo	<p>Neste trabalho, os autores, pretenderam estabelecer uma relação entre os parâmetros de marcação <i>laser</i> e a qualidade obtida nos DMCs marcados em substratos com 8,1 mm de espessura de aço ao carbono laminados a frio: AISI C1008/1010 (Baixo teor em carbono) e AISI C1095 (Elevado teor em carbono). Os parâmetros foram testados utilizando um planeamento de experiências fatorial com um número de condições de tratamento igual a 2^k, onde k representa o número de fatores experimentais (neste caso 5 fatores - 4 referentes aos parâmetros de processo e 1 relativo ao tipo de aço ao carbono). Cada condição de tratamento foi replicada quatro vezes, perfazendo um total de 128 experiências que foram realizadas de forma aleatória.</p> <p>A qualidade de todos os DMCs foi avaliada de acordo com a norma ISO/IEC 16022:2006 - "<i>Automatic identification and data capture techniques - Data Matrix bar code symbology specification</i>", através da recolha de cinco imagens por cada inspeção efetuada por um verificador próprio para o efeito. O processo de verificação foi realizado duas vezes, isto é, dentro do intervalo de 24 horas após a geração dos DMCs e imediatamente após serem sujeitos a um processo de limpeza.</p> <p>Os efeitos dos 5 fatores controláveis na qualidade do DMC foram investigados através da realização de uma ANOVA multifatorial. Os autores recorreram ao SEM para verificar o estado dos substratos antes e após a limpeza, e ao EDS (<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>) para determinar a composição química da superfície dos substratos após a marcação. Verificaram que o óxido presente ao redor do DMC surgiu, provavelmente, devido à evaporação do material durante o processo de marcação <i>laser</i>, que posteriormente assentou e arrefeceu ao seu redor. Esta camada foi possível remover após o processo de limpeza. Os resultados apresentaram um nível compatível com as</p>

necessidades em termos de *Axial Uniformity*, sendo o *Cell Contrast* e o *Print Growth* as características que limitaram a obtenção de DMCs com classes de qualidade mais elevadas. No entanto, após a limpeza do substrato, o contraste entre a área processada e o substrato subjacente melhorou, resultando num menor *Print Growth*. Concluiu-se, portanto, que o processo de limpeza afeta significativamente a qualidade dos DMCs produzidos no aço ao carbono, e que os parâmetros do *laser* devem ser cuidadosamente selecionados para evitar resíduos que podem gerar uma classe de qualidade final inaceitável.

Parâmetro testado	Resultados
Frequência de impulso	Mostrou-se que existe efeito significativo da frequência de impulso na qualidade obtida nos DMCs marcados, devido ao facto do seu efeito ser estatisticamente significativo na maioria das características do DMC, antes e após o processo de limpeza.
Potência média	Provou-se que, tal como para a frequência de impulso, existe efeito significativo da potência média na qualidade obtida nos DMCs marcados, devido ao facto do seu efeito ser estatisticamente significativo na maioria das características do DMC, antes e após o processo de limpeza.
Velocidade de marcação	Demonstrou-se que, embora a velocidade de marcação não possua efeitos estatisticamente significativos por si só nas características do DMC, a interação com outros parâmetros de marcação <i>laser</i> , possui.
Sobreposição de passagem	Verificou-se, tal como na velocidade de marcação, que embora a sobreposição de passagem não possua efeitos estatisticamente significativos por si só nas características do DMC, a interação com outros parâmetros de marcação <i>laser</i> , possui.

2.3 O Planeamento de Experiências (DoE)

Segundo Miryam [5], o DoE pode ser encarado como uma metodologia estatística sistemática e organizada, utilizada na análise de problemas de qualidade e na melhoria contínua do desempenho de processos produtivos. É reconhecida como um meio eficaz de atingir a excelência na qualidade dos produtos e serviços de forma económica, pois podem ser obtidos resultados fiáveis através de um número relativamente pequeno de experiências ou observações. O DoE permite identificar os fatores que afetam uma determinada variável de resposta e que contribuem para a redução da variabilidade (melhoria da qualidade) através da observação da variação como resposta [79,80,81].

Este método, pode ser utilizado em processos com os seguintes objetivos [82]: i) auxílio no desenvolvimento de um processo, contribuindo para a qualidade baseada no projeto (*Quality by Design - QbD*); ii) determinação da robustez de um processo; e iii) melhoria de *performance*. De acordo com Durakovic [81], as etapas práticas gerais e diretrizes para implementar o DoE são as seguintes:

1. **Criação do grupo de trabalho** - criar um grupo constituído por três a seis elementos;
2. **Definição dos objetivos** - delinear os objetivos e problemas a investigar;
3. **Definição da variável de resposta** - definir o resultado mensurável da experiência, baseado nos objetivos definidos;
4. **Seleção dos fatores que podem afetar a variável de resposta** - identificar as variáveis independentes (fatores) que podem afetar a variável de resposta. Nesta etapa, pode ser utilizada, por exemplo, a técnica *brainstorming* ou o Diagrama de Causa e Efeito;
5. **Identificação dos fatores críticos, interações e seleção dos seus níveis** - efetuar uma triagem para identificação dos fatores significativos, classificando-os em: i) fatores controláveis; e ii) fatores de ruído, controláveis e não controláveis. Definir o número de níveis para cada fator, repetições por condição (considerar aspetos técnicos e económicos) e identificar e analisar as interações, limitando o estudo a interações de 2ª ordem. Dada a importância da categorização de fatores controláveis e não controláveis, de seguida, é apresentada uma breve explicação. Na Figura 20, representa-se um processo produtivo como um sistema que, através de um conjunto de atividades, transforma entradas, tipicamente matéria-prima, componentes e informação em produto acabado, ou seja, saídas com várias características de qualidade associadas.

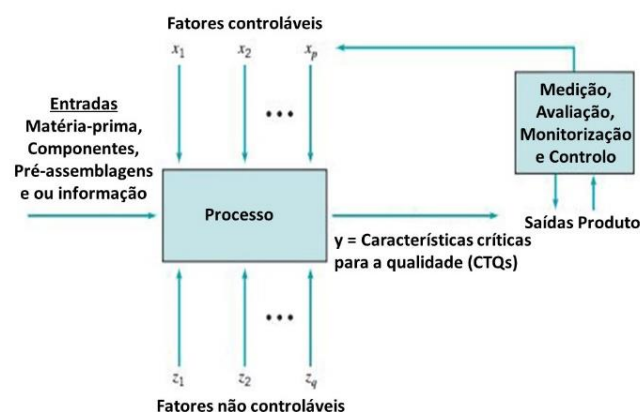


Figura 20 - Entradas e saídas de um processo produtivo. Adaptado de [83]

Em processos produtivos, existem fatores controláveis (x_1, x_2, \dots, x_p), tais como temperaturas, pressões, velocidades e fatores incontroláveis, ou de difícil controlo (z_1, z_2, \dots, z_p), que correspondem, por exemplo, a fatores ambientais ou propriedades de matérias-primas fornecidas por um fornecedor externo [83]. Os

processos devem estar ajustados ao produto e serviço que originam, para que seja assegurada a sua eficácia, eficiência e inexistência de desperdícios.

O DoE, método estruturado e organizado, determina as relações entre os fatores de entrada (x_i - variáveis independentes) que afetam uma ou mais respostas de saída (variáveis críticas para a qualidade (*Critical to Quality* - CTQ) e dependentes de y), através do estabelecimento de modelos matemáticos ($y = f(x_i)$) [84].

Quando uma variável CTQ se desvia do valor alvo, causa uma perda. Procurar continuamente a redução da variabilidade em torno do valor-alvo, em características críticas de qualidade, é a chave para obter qualidade e reduzir custos [85].

6. **Seleção do tipo de planeamento de experiências e matriz ortogonal** - escolher um dos tipos de planeamento de experiências, por exemplo: ad hoc, fatorial completo e fatorial fracionado (o mais eficiente), tendo em consideração não só os objetivos e as limitações, como também os parâmetros, os níveis e as interações. Selecionar a matriz ortogonal;
7. **Seleção do método de medição** - escolher um método de medição adequado às condições de teste, com a precisão necessária e com boa repetibilidade;
8. **Programação dos testes** - programar os testes tendo em consideração: i) o número de variáveis estudadas (incluindo variáveis aleatórias); ii) o número de repetições e tipos de medição; iii) a garantia das condições de ensaio idênticas entre ensaios (meio ambiente, operador, lote utilizado); e iv) o nome do técnico responsável;
9. **Execução dos testes** - seguir a matriz do projeto;
10. **Análise de dados recorrendo a métodos estatísticos** - utilizar técnicas de regressão e análise de variância (*Analysis of Variance* - ANOVA);
11. **Análise do índice Sinal/Ruído (*Signal/Noise Ratio* - S/N)** - identificar os fatores que afetam a variável de resposta. Nesta etapa, os fatores que contribuem para a redução da variabilidade (melhoria da qualidade) podem ser identificados rapidamente através da observação da variação como resposta. Através da escolha do tipo de relação do índice S/N, é possível assinalar quais os melhores níveis das variáveis de controlo, tendo em consideração o valor residual de afetação das variáveis de ruído, externas ao processo. Este tipo de relações podem ser do tipo [86]: i) o valor-alvo é o melhor; ii) o menor valor é o melhor - quanto menor, melhor; e iii) o maior valor é o melhor - quanto maior, melhor;
12. **Construção do modelo** - criar um modelo matemático que inclua o efeito dos fatores e interações;
13. **Validação do modelo** - efetuar experiência para validar o modelo escolhido antes da implementação ser executada;
14. **Conclusões e recomendações práticas** - incluir representação gráfica dos resultados e validação dos resultados.

CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA, DO PROCESSO E DO PROBLEMA

3.1 Grupo Bosch

3.2 Bosch Car Multimédia Portugal, S.A.

3 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA, DO PROCESSO E DO PROBLEMA

Neste capítulo da dissertação é caracterizada a empresa Bosch Car Multimédia Portugal S.A., sediada em Braga, onde se desenvolveu o presente trabalho, assim como o processo e o problema existente.

3.1 Grupo Bosch

3.1.1 História do Grupo Bosch

O grupo Bosch surgiu em Estugarda, no ano de 1886, momento em que Robert Bosch (1861-1942), com apenas 25 anos, inaugurou uma oficina de precisão mecânica e engenharia elétrica. Foi através da invenção bem-sucedida de um dispositivo de ignição magnética de baixa tensão para motores de combustão interna, designado por magneto, que a Bosch se tornou comercialmente conhecida. O magneto serviu como fonte de inspiração para o seu logotipo associando a empresa, desde então, à indústria automóvel (Figura 21).



Figura 21 - Logotipo Bosch [87]

O Grupo encontra-se sediado em Schillerhöhe (Estugarda), sendo considerado atualmente, como uma das maiores empresas da Alemanha. A expansão do Grupo tem sido notável, com presença em cerca de 140 países, perfaz um total de 292 empresas e 280 000 colaboradores por todo o mundo.

Embora atualmente o Grupo Bosch seja o principal fornecedor da indústria automóvel, devido à constante procura de soluções que permitam proporcionar uma condução segura e agradável, o setor automóvel apenas representa 60% do total das suas vendas. Os restantes 40%, provêm das áreas de negócio de tecnologia industrial, tecnologia de energia e construção e bens de consumo, setores nos quais a empresa também atua.

3.1.2 Missão, Visão e Valores

O Grupo Bosch, enquanto empresa líder mundial no fornecimento de tecnologia e serviços, tem como propósito o desenvolvimento de tecnologia para a vida, isto é, o desenvolvimento de produtos que entusiasmem, melhorem a qualidade de vida das pessoas e ajudem a conservar os recursos naturais. A afirmação da missão “Somos Bosch” fornece a base para a estratégia de funcionamento das unidades ao transmitir a

forma como a empresa se vê a si própria e obter o comprometimento de todos para com a organização. Diariamente, a Bosch trabalha para alcançar o sucesso económico sustentado e liderar os mercados onde intervém, sem jamais colocar em causa os valores sociais e ambientais que suportam a sua visão.

O *Bosch Business System (BBS)* é a resposta da Bosch para suprir a necessidade de sistematização que permita implementar com sucesso a sua visão e dinamize a melhoria contínua em todas as organizações (Figura 22).

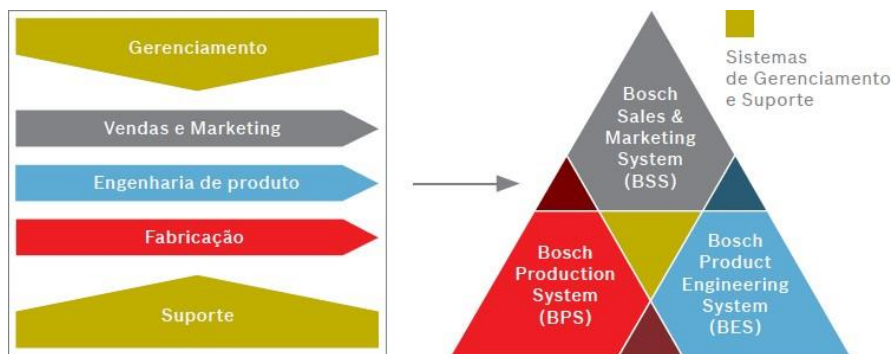


Figura 22 - Bosch Business System [88]

Em 2002, surgiu o Bosch Production System (BPS), representado na Figura 22. O BPS trata-se do Sistema de Produção da Bosch, que procura o desenvolvimento contínuo e global dos processos de produção e logística com a finalidade de alcançar processos padronizados, sem desperdícios, livres de problemas e capazes de reduzir a carga do colaborador [4]. Tal é atingível através da utilização de oito princípios que são a base do sistema: i) Sistema puxado; ii) Orientação para o processo; iii) Qualidade perfeita; iv) Flexibilidade; v) Padronização; vi) Eliminação dos desperdícios e melhoria contínua; vii) Processo transparente; viii) Envolvimento e responsabilização dos colaboradores.

Segundo a Bosch, os valores da empresa são os pilares sobre os quais os sucessos do passado foram construídos [88]. Estes valores, representados na Figura 23, transmitem os aspetos com os quais a empresa se compromete e procuram orientar a gestão para o que é verdadeiramente importante.



Figura 23 - Valores Bosch [88]

3.2 Bosch Car Multimédia Portugal, S.A.

Em Portugal, o grupo Bosch possui cinco unidades de produção e comercialização de vários ramos de atividade, entre as quais a Bosch Car Multimédia Portugal, S.A. (Figura 24).



Figura 24 - Bosch Car Multimédia Portugal, S.A.

3.2.1 Departamentos e Secções

A Bosch Car Multimédia Portugal, S.A. apresenta duas áreas: a área comercial (Figura 25) e a área técnica (Figura 26), sendo que cada uma é dirigida por um responsável. A área comercial, divide-se em sete departamentos: o Serviço pós-venda e produção de aparelhos de substituição e reparações, os Serviços Informáticos Locais, a Contabilidade Financeira, a Logística, os Recursos Humanos, as Compras e as Compras Avançadas [89]. A área técnica é também constituída por sete departamentos: o Desenvolvimento, a Saúde, Segurança e Ambiente, o Processo SMT (Surface Mount Technology), a Montagem Final, a Gestão de Qualidade de Compras, a Gestão da Qualidade e Métodos e o departamento de Funções Técnicas [89].



Figura 25 - Área Comercial [89]



Figura 26 - Área Técnica [89]

O Departamento de Engenharia de Industrialização (MFE), no qual surge o projeto de investigação, tem como função industrializar o produto, o que implica conceber, planear, desenvolver, instalar e assegurar o correto funcionamento das linhas de produção na montagem final, até ao fim de vida do produto.

A estrutura organizacional MFE está desenhada à medida desta missão, dividida em três departamentos: MFE1, MFE2 e MFE3. À equipa de MFE2, à qual pertence o autor da dissertação, compete o desenho, a configuração e instalação das linhas de produção.

3.2.2 Produtos e clientes

Tal como referido anteriormente, a unidade da Bosch em Braga é especializada na produção e inovação de produtos eletrónicos para a indústria automóvel. Os principais clientes da Bosch Car Multimédia Portugal, S.A. são a BMW, a Audi, a PSA, e a Volkswagen. Além destes, a Bosch Car Multimédia fornece ainda produtos para outros clientes da indústria automóvel e de outras indústrias, como se pode verificar na Figura 27 [89].



Figura 27 - Principais clientes da Bosch Car Multimédia S.A. [89]

Ultimamente, esta unidade, tem conseguido diversificar a sua panóplia de produtos na indústria automóvel (Figura 28) e tem realizado parcerias-chave com universidades, nomeadamente através do investimento em projetos de investigação e desenvolvimento (I&D) para uma condução autónoma segura e fiável, trabalhando para tal em *hardware*, *software* e serviços. O RADAR (Radio Detection And Ranging) é uma das excelentes contribuições [90].

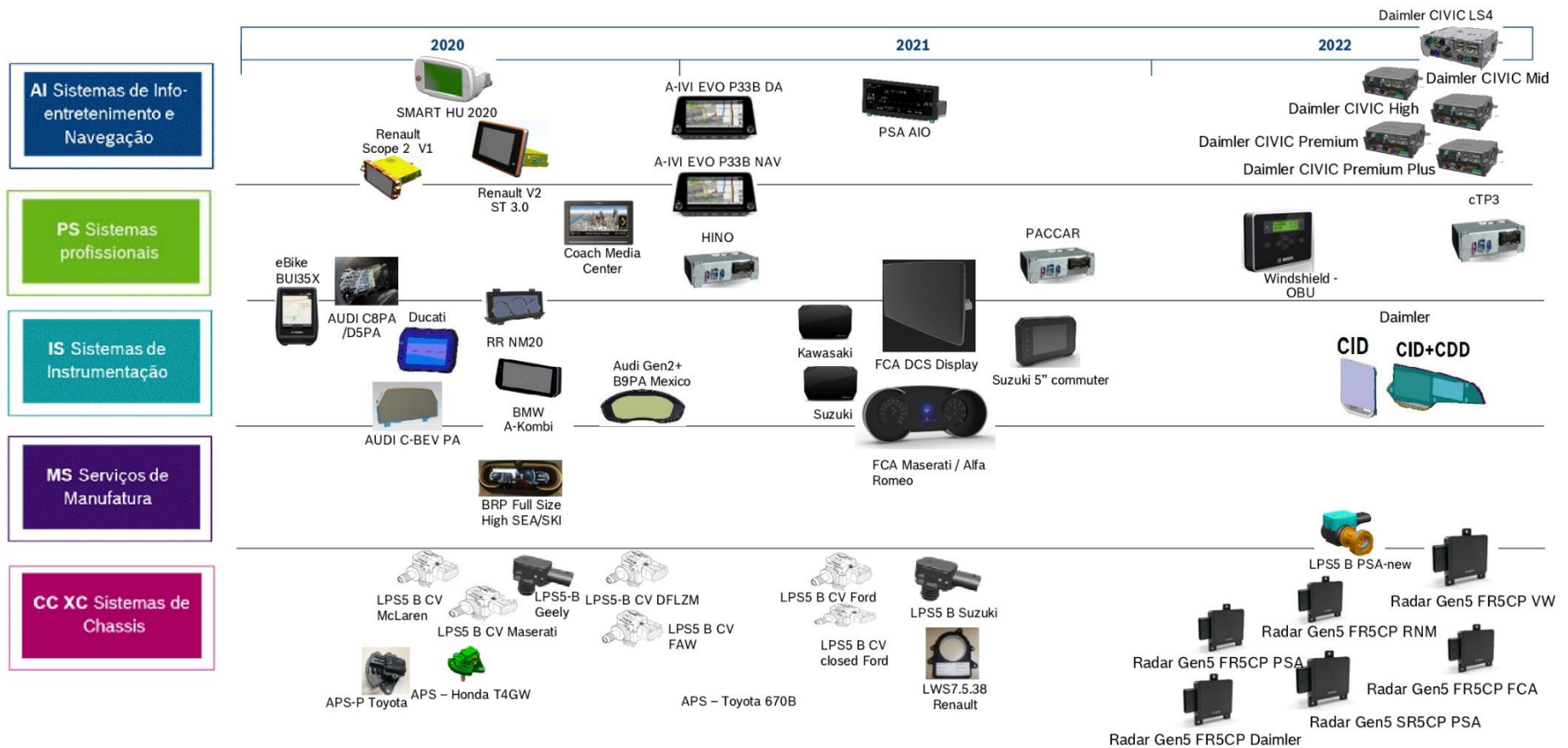


Figura 28 - Produtos da Bosch Car Multimédia Portugal S.A. [89]

3.2.3 Processo de marcação *laser*

Na Bosch Car Multimédia Portugal, S.A o processo de marcação *laser* é sobretudo aplicado na produção de Sistemas de Instrumentação (*Instrumentation Systems - IS*), também designados por painéis de instrumentos, e Sistemas de Chassis (*Chassis systems Control - CC*) tais como sensores de ângulo de direção, sensores de baixa pressão e sensores de posição e de movimento dos veículos (Figura 28). Através deste processo, é frequentemente marcado: i) o logotipo da Bosch e do cliente; ii) um conjunto de símbolos funcionais e de certificações que permitem a comercialização dos produtos para vários países distintos; iii) um DMC ou texto contendo dados de rastreabilidade e dados técnicos tais como o número de peça, número de série, data de fabrico e versão de *software*; e iv) um QR com informações adicionais sobre o produto.

A marcação *laser* é muitas vezes considerada uma característica especial do produto, isto é, uma característica chave, crítica, e significativa para o mesmo, em que a sua não conformidade pode ter um impacto crucial no cumprimento de normas legais e na satisfação do cliente. Uma vez considerada característica especial, a marcação *laser* tem de ser controlada e inspecionada para garantir que não são enviadas peças defeituosas para o cliente. Por esta razão, nas linhas produtivas é comum utilizarem-se sistemas de inspeção ótica automáticos (*Automatic Optical Inspection - AOI*) que realizam a inspeção de todo o conteúdo marcado por comparação com uma imagem padrão. Exemplo disso, é a linha de montagem final de painéis de instrumentos para motociclos (*Two wheelers - 2W02*) em que os painéis de instrumentos chegam aos postos de marcação *laser* sombreados a azul já montados após terem passado por vários processos tais como o tratamento superficial por plasma, dispensação de adesivo, cura (forno) e toda a cadeia de testes funcionais. Após a marcação *laser* é realizada a inspeção no AOI de todo o conteúdo marcado e é realizada a embalagem (*Packaging - PACK*) com uma leitura prévia do DMC através de um *scanner* (Figura 29). Os postos de marcação *laser* desta linha são do tipo fibra ótica da marca Rofin, Coherent® (Figura 30) e são constituídos por um prato rotativo que permite alimentar uma peça enquanto outra é processada no seu interior. Quando a peça é colocada em cima da base, o sensor ótico é acionado e é dado o *trigger* de leitura ao *scanner*, que por sua vez lê uma etiqueta previamente colada no produto numa posição bem definida. Esta etiqueta indica ao *software* o programa de marcação a executar com base no *part number* que contém.

A problemática existente no processo de marcação *laser*, que por sua vez é mais incidente na linha 2W02, reside precisamente na dificuldade de leitura do conteúdo marcado por parte do AOI e dos *scanners* que exigem que a qualidade da marcação *laser* seja cuidadosamente controlada de forma a garantir uma legibilidade consistente. As falhas de leitura traduzem-se em rejeição, produto sucitado e paragens de produção, fazendo com que os técnicos de manutenção por vezes alterem os valores dos diferentes parâmetros de marcação *laser* recomendados pelo fabricante do equipamento de fonte *laser* nas suas intervenções de forma empírica, sem qualquer estudo que suporte o sentido dessas alterações para simplesmente a linha continuar a produzir.

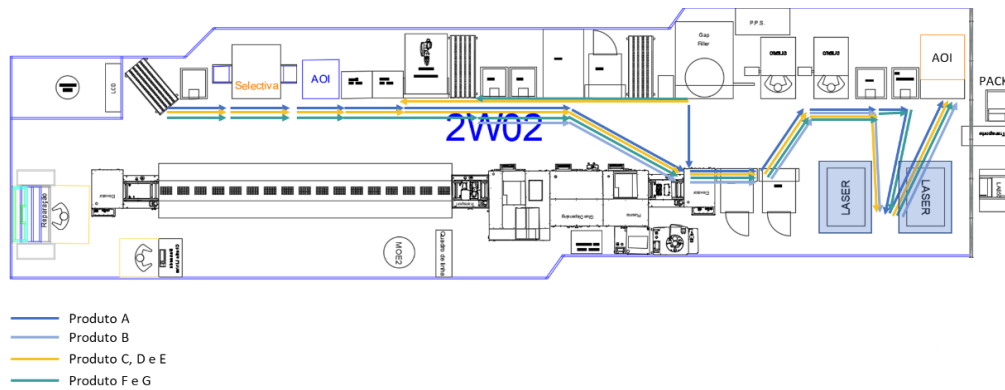


Figura 29 - Layout e fluxo produtivo da linha 2W02



Figura 30 - Equipamento de marcação *laser* de fibra ótica instalado na linha 2W02

Isto acontece porque nem sempre os valores recomendados são os que conferem melhor qualidade, fiabilidade e robustez à marcação especialmente quando se trata de materiais complexos para efetuar marcação *laser* como o caso do Ultradur® B 4406 G6, PBT-GF30 FR(17), que é o material mais crítico desta linha. As propriedades físicas e mecânicas deste material encontram-se resumidas na Tabela 12 e detalhadas no Anexo A. No Anexo B encontra-se a composição do material. A complexidade de executar a marcação *laser* neste material reside sobretudo devido: i) ao facto deste material não ser considerado *laser-markable*, isto é, indicado para marcação a *laser* (Anexo C); ii) à presença de manchas superficiais inerentes à injeção que não são possíveis de eliminar; iii) à presença de fibra de vidro que provoca reflexões na leitura do conteúdo marcado. Conforme pode observar-se no Anexo C existem outras classes de material Ultradur® (PBT) que também possuem características retardantes à chama e que são indicados para marcação *laser*, no entanto, não preenchem os requisitos para o produto em termos de propriedades físicas e mecânicas que o desenvolvimento mecânico definiu como mais importantes. Na Figura 31, encontra-se o Produto E, cuja constituição (Figura 32), é muito semelhante à dos produtos B, C, D e G produzidos na linha 2W02 (Figura 29). Nestes produtos o material Ultradur® B 4406 G6, PBT-GF30 FR(17) é utilizado na tampa (*Back housing*), onde é executada a marcação *laser*. Este material carece de um estudo dos melhores parâmetros para se minimizarem os efeitos da problemática atual.

Tabela 12 – Propriedades do material utilizado no estudo

Material		Ultradur® B 4406 G6, PBT-GF30 FR(17)	
Propriedades Físicas			
Densidade (g/cm ³)	Ponto de fusão (°C)	Condutividade Térmica 23°C (W/(m·K))	Calor específico 23°C (J/(kg·K))
1,65	223	0,32	900
Propriedades Mecânicas			
Resistência Máxima à Tração (MPa)	Modulo de Elasticidade (GPa)	Resistência ao Impacto Charpy (kJ/m ²)	
		+23°C	-30°C
145	11,3	60	55



Figura 31 - Produto E, com *display* de 6.5"

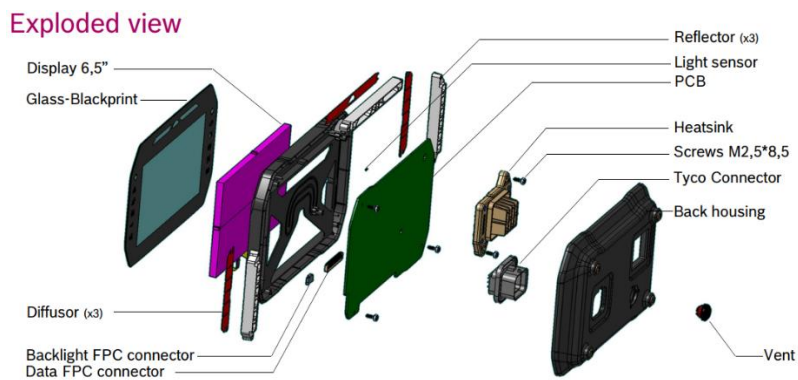


Figura 32 - Vista explodida do Produto E

DESENVOLVIMENTO

- 4.1 Materiais
- 4.2 Meios utilizados
- 4.3 Métodos
- 4.4 Ensaios
- 4.5 Análise da qualidade dos códigos
- 4.6 Análise estatística das amostras DMC
- 4.7 Análise estatística das amostras QR
- 4.8 Análise da superfície marcada nas amostras
- 4.9 Correspondência das análises estatísticas com as análises laboratoriais
- 4.10 Comparação dos resultados obtidos com estudos semelhantes

4 DESENVOLVIMENTO

Com vista a resolver a problemática existente no processo de marcação *laser* apresentada no capítulo 3.2.3 e atingir os objetivos propostos para esta dissertação, efetuou-se um estudo da influência dos parâmetros na qualidade do conteúdo marcado adotando para tal a metodologia DoE - *Design of Experiments*. Neste capítulo apresenta-se a equipa envolvida no projeto, bem como o material de estudo e os métodos e meios utilizados para a sua concretização. Apresentam-se também os ensaios realizados, resultados obtidos e uma análise crítica aos mesmos. A equipa envolvida no projeto é constituída por seis elementos: um dono do processo, dois especialistas de processo e três elementos de investigação e desenvolvimento. Após a criação da equipa, tendo em consideração os objetivos do projeto, definiram-se atividades e delegaram-se tarefas de forma a potenciar a eficiência no trabalho e o comprometimento dos membros, concentrando os esforços apenas nos tópicos mais relevantes.

4.1 Materiais

Assim como referido anteriormente no capítulo 3.2.3, o material mais crítico e que mais contribui para o problema existente no processo de marcação *laser*, mais propriamente na linha 2W02, é o Ultradur® B 4406 G6, PBT-GF30 FR(17). Por esta razão, é sobre este material que se debruça o estudo de influência dos parâmetros de marcação *laser* na qualidade do conteúdo marcado. No capítulo 3.2.3, encontram-se descritas as propriedades físicas e químicas deste material, bem como a sua aplicação nos painéis de instrumentos para motociclos. Como fruto da boa relação existente entre a Bosch e o fornecedor de matéria-prima, o mesmo disponibilizou-se a oferecer as peças para os testes de marcação *laser*.

4.2 Meios utilizados

As amostras foram obtidas recorrendo a um dos postos de marcação *laser* da marca Rofin, Coherent® instalado na linha 2W02. No interior destes postos encontra-se um *laser* de fibra ótica de modelo designado de PowerLine F20 (Figura 33), cuja ficha técnica se encontra no Anexo D. O *laser* utilizado nos testes, corresponde a um *laser* de classe 1 com as portas fechadas (seguro durante a utilização nestas condições) e de classe 4 quando se está exposto ao mesmo (representa um perigo em situações de exposição ocular ou pele de radiação directa ou difusa e apresenta elevados riscos de incêndio). Note-se que os sistemas *laser* são classificados em classes de perigo 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B, 4, em função do dano que a radiação acessível pode causar ao corpo humano em condições normais de funcionamento. Este *laser* possui uma potência de 20 W e um comprimento de onda de 1064 nm cuja fibra é bombeada por díodos de itérbio (Yb). As características do sistema *laser* utilizado encontram-se descritas na Tabela 13.

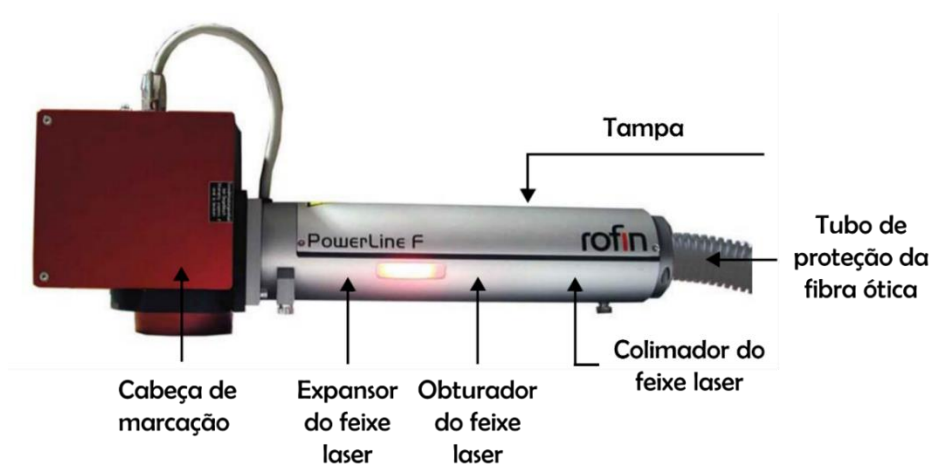


Figura 33 - Cabeça de marcação *laser* utilizada no estudo

Tabela 13 - Características do sistema *laser*



Característica / Parâmetro	Valor
Laser / Meio de ativação	Laser de fibra bombeada por díodos de Itérbio (Yb)
Modo de operação	Pulsado
Comprimento de onda (λ)	1065 nm \pm 5 nm
Diâmetro do spot (D)	20 μ m
Potência Média (P)	0 - 20 W
Frequência de impulso (f)	20 - 80 kHz
Velocidade de marcação (V)	0 - 20 000 mm/s
Sobreposição de passagem (S)	0 - 100%
Comprimento do impulso (τ)	4 - 200 ns
Área de trabalho	120 x 120 mm

Na Bosch recorreram-se a dois laboratórios distintos:

- Laboratório de engenharia da qualidade;
- Laboratório de engenharia química.

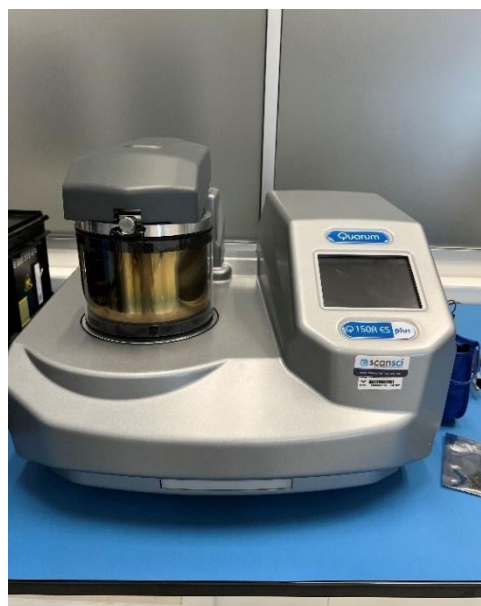
Na Tabela 14, estão detalhados todos os equipamentos utilizados nos laboratórios referidos anteriormente.

Tabela 14 - Equipamentos utilizados nos laboratórios

Descrição do equipamento	Representação do equipamento
<p>No laboratório de qualidade, analisaram-se os códigos marcados recorrendo a um verificador da marca REA® - modelo VeriCube para classificar a qualidade dos códigos com rigor segundo a norma ISO/IEC 29158:2020, com ângulo, distância e quantidade de luz bem definidas.</p>	
<p>Posteriormente, efetuou-se o corte das amostras para análise química através de uma fresa acoplada a uma máquina de bancada de furar e fresar da marca OPTIMUM® - modelo OPTI drill DX 15V.</p>	

No laboratório químico, recorreu-se à técnica *Physical Vapour Deposition (PVD)* por sputtering para aplicação de um filme fino de ouro e, desta forma, preparar as amostras para o SEM. Utilizou-se um equipamento da marca Quorum® - modelo Q150R ES PLUS.

Esta etapa permite: i) melhorar a condutividade térmica da superfície e, por sua vez, minimizar os efeitos de carga durante a análise; ii) melhorar a emissão de elétrons secundários; e iii) reduzir a penetração do feixe, o que se traduz numa maior proteção das amostras e melhoria da resolução da imagem.



No laboratório químico, recorreu-se ao SEM da marca HITACHI® - modelo FlexSEM 1000 aliado a um sistema EDS próprio para este modelo, da marca Bruker® - modelo Quantax 80 com o intuito de analisar de forma detalhada as superfícies marcadas.



4.3 Métodos

O processo de marcação *laser* das amostras começou por uma fase de planeamento para receção da matéria-prima necessária e paralelamente com a verificação do plano de produção e as paragens planeadas de forma a executar os testes sem comprometer as entregas aos clientes. Na Tabela 15, estão descritas as etapas de preparação dos testes.

Tabela 15 - Etapas de preparação dos testes

Procedimento	Representação
<p>Identificaram-se todas as peças, tendo-se registado fotograficamente o seu aspeto superficial.</p>	
<p>De seguida, com o <i>software</i> de marcação <i>laser Visual Laser Marker (VLM)</i>, da Rofin, Coherent®, criou-se um programa exclusivo para a área polida, por se tratar da zona em que o DMC e o QR serão marcados na produção. Optou-se por posicionar os códigos em zonas diferentes da área polida, para avaliar o efeito da presença de manchas na superfície (rodeadas na imagem) no contraste dos códigos. Consideraram-se três códigos QR (QR1, QR2, QR3) e um DMC, pelo facto de o QR ter uma maior densidade de informação que se traduz numa maior complexidade de realização do processo.</p>	
<p>Após a criação do programa de marcação, averiguou-se a necessidade de limpeza da lente, do sistema de extração e meio envolvente. Por recomendação do fabricante esta limpeza deve ser efetuada a cada 2000 horas de trabalho. Decidiu-se efetuar a limpeza recorrendo para tal ao material do fabricante, cujos componentes são: um líquido apropriado, lenços descartáveis de limpeza profissional, cotonetes, uma lanterna, podendo ainda ser usado ar para uma melhor remoção das partículas.</p>	

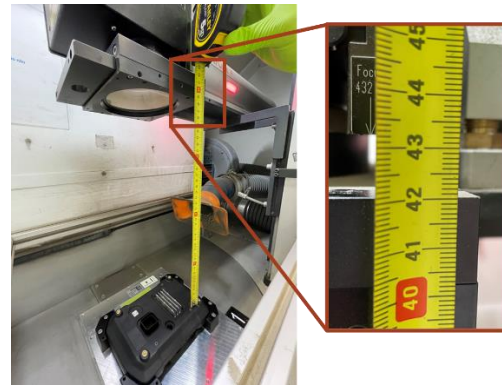
Procedeu-se cuidadosamente à remoção da lente de foco acoplada à cabeça de marcação.



Terminada a remoção da lente de foco, colocou-se a mesma sob iluminação de uma lanterna, de modo a visualizar todas as partículas indesejadas. De seguida, com o auxílio de um lenço descartável de limpeza profissional e de líquido à base de metanol, executou-se a limpeza. Introduziu-se novamente a lente de foco da mesma forma que se retirou da cabeça de marcação.



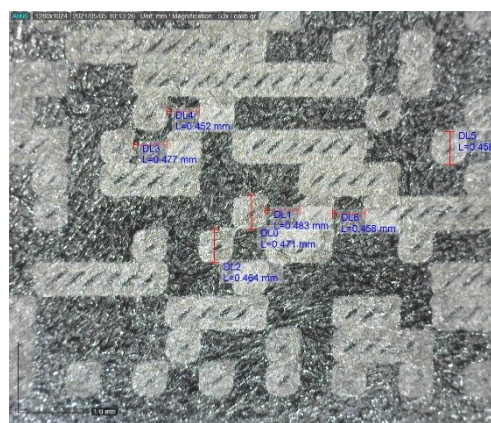
Efetuuou-se o ajuste da distância focal de forma a cumprir a distância de 432 mm desde a referência na cabeça de marcação à superfície da peça.



Após o ajuste da distância focal, e numa peça destinada ao *setup*, marcou-se um código com as dimensões 9 mm x 9 mm e confirmou-se a sua dimensão através do microscópio da marca Dino-Lite® - modelo AM3113T, efetuando-se desta forma a confirmação da distância focal. De seguida, marcou-se uma linha e mediu-se a sua espessura através do mesmo microscópio, tendo-se obtido o valor de 0,262 mm. Com o valor obtido fixou-se a espessura da linha no *software* VLM.



Ativou-se a função de linha de contorno na marcação dos módulos com o intuito de se obterem códigos com quadrados bem definidos por oposição às marcas irregulares obtidas somente com o formato do próprio *spot* do *laser*, que teriam impacto negativo na legibilidade. Visto que esta linha lhes confere um tamanho superior, ajustou-se de forma iterativa a dimensão dos módulos medindo-os com o microscópio utilizado na etapa anterior e ajustando no *software* VLM o *outline offset* - fator de correção aplicado para marcar a linha de contorno, até se obter uma distribuição uniforme entre o tamanho do módulo marcado e o espaço ao seu redor. Aplicou-se uma correção de 0,05 mm para o QR e de 0,06 mm para o DMC.



Concluído o *setup* do posto, iniciou-se a marcação das amostras segundo o plano de experiências. Cada experiência corresponde a uma amostra e cada amostra contém três códigos QR (QR1, QR2, QR3) e um DMC, todos eles com os mesmos parâmetros de marcação, mas em posições diferentes da área polida.



Após as amostras estarem marcadas, passou-se à fase das análises em laboratório. Na Tabela 16 estão descritas todas as etapas referentes a esta fase.

Tabela 16 - Etapas das análises em laboratório

Procedimento	Representação
<p>Recorrendo a um verificador da marca REA® - modelo VeriCube, obteve-se com rigor a classificação das várias características dos códigos de A (4.0) a F (0.0) segundo a norma ISO/IEC 29158:2020, correspondendo: A, à melhor classificação, e F, à pior classificação</p>	
<p>Posteriormente, efetuou-se o corte das amostras sobre a área polida através de uma fresa acoplada a uma máquina de bancada de furar e fresar da marca OPTIMUM® - modelo OPTI drill DX 15V, para aplicação de um filme fino de ouro.</p>	
<p>No laboratório químico, mais concretamente com o SEM da marca HITACHI® - modelo FlexSEM 1000, analisou-se de forma detalhada a superfície marcada de várias amostras. Obtiveram-se imagens à escala de 50 µm e 100 µm em duas zonas distintas dos códigos conforme a figura (centro e canto). Recorrendo a um sistema EDS próprio para este modelo, da marca Bruker® - modelo Quantax 80, analisou-se quimicamente uma amostra numa área sem, e com marcação <i>laser</i>.</p>	

4.4 Ensaios

Os ensaios foram realizados na empresa de acolhimento, mais propriamente na linha 2W02. As amostras foram obtidas recorrendo a um equipamento de fonte *laser* e um tipo de material plástico, tal como referido anteriormente.

A equipa do projeto selecionou por consenso os parâmetros a utilizar nos ensaios, os quais, por sua vez, se encontravam alinhados com estudos semelhantes efetuados por outros autores. Consideraram-se quatro parâmetros de marcação *laser*, com variações de valor diferentes do recomendado pelo fabricante do equipamento de fonte *laser* (Figura 34), neste caso a Rofin, Coherent®.

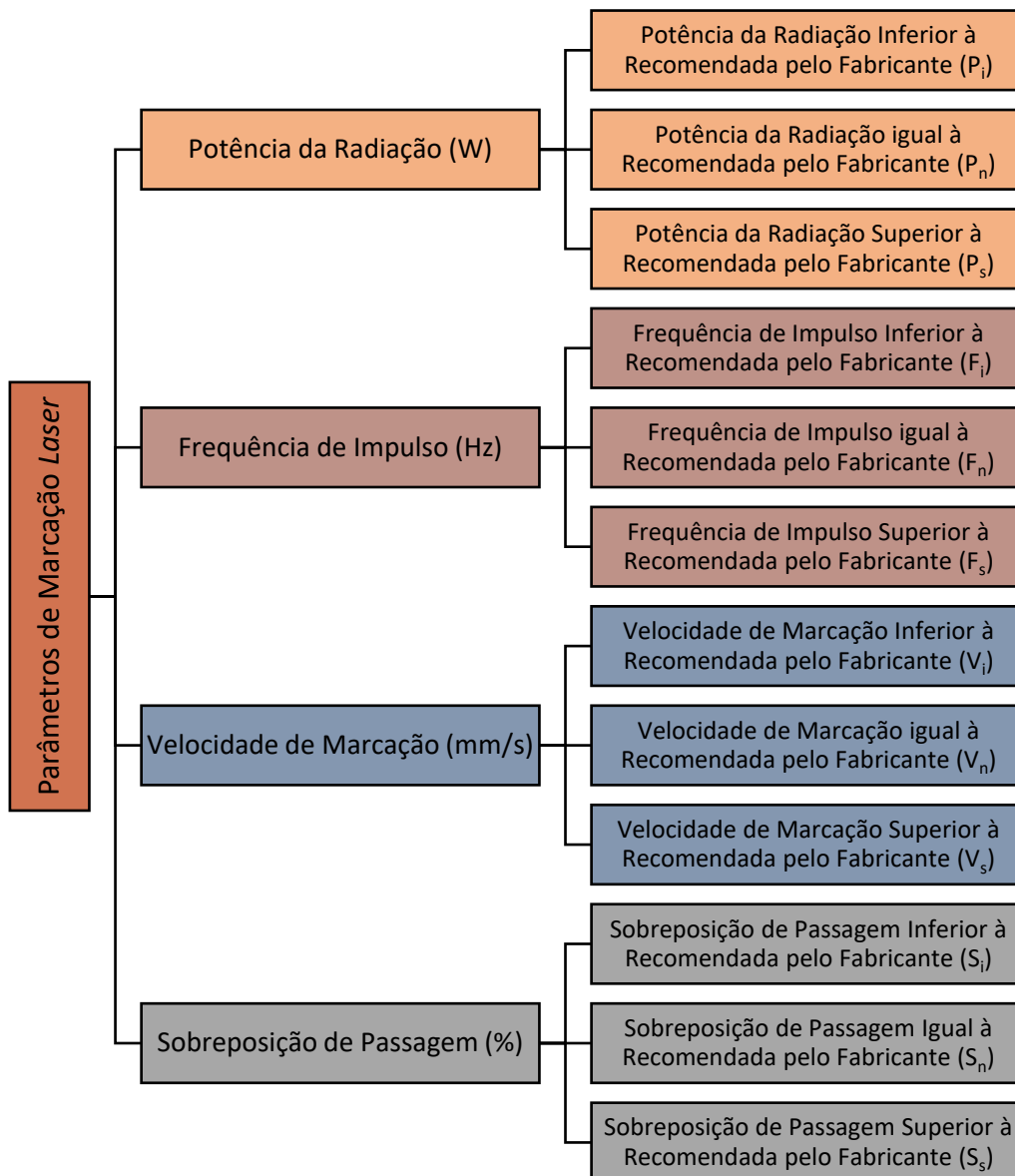


Figura 34 - Parâmetros de marcação *laser* considerados no estudo

Escolheu-se um planeamento de experiências do tipo fatorial completo, tendo em consideração os objetivos do estudo, os parâmetros e os níveis (Tabela 17). Através do

software MiniTab® obteve-se o conjunto de experiências a realizar, com variação de parâmetros aleatória, neste caso 81 experiências (resultado obtido pelo número de níveis elevado ao número de fatores - 3^4 , 4 fatores com 3 níveis cada um).

Relativamente às variáveis de resposta, ou seja, aos resultados mensuráveis da experiência, a equipa considerou relevante considerar o estado do DMC e QR relativamente às características: *i) Decodability; ii) Cell Contrast (CC); iii) Cell Modulation (CM); iv) Fixed Pattern Damage (FPD); v) Axial Non-Uniformity (ANU); e vi) Grid Non-Uniformity (GNU).*

Tabela 17 - Fatores e níveis de estudo

Fator	Nome	Níveis	Valores de níveis		
			P _i	P _n	P _s
A	Potência da Radiação (W)	3	15	17	19
B	Frequência de Impulso (Hz)	3	15 000	25 000	30 000
C	Velocidade de Marcação (mm/s)	3	1000	2000	3000
D	Sobreposição de Passagem (%)	3	0	15	30

Com o conjunto de parâmetros selecionado e com as variações impostas, o plano de experiências a realizar distribui-se da forma representada na Tabela 18.

Recorde-se que a potência da radiação, frequência de impulso, velocidade de marcação e sobreposição de passagem nominais (recomendadas pelo fabricante) são de: 17 W, 25 000 Hz, 2000 mm/s e 15%, respetivamente.

Tabela 18 - Ensaios a realizar no equipamento

Amostra	Potência da Radiação (W)	Frequência de Impulso (Hz)	Velocidade de Marcação (mm/s)	Sobreposição de Passagem (%)
1	17	25 000	3000	0
2	15	25 000	3000	0
3	15	30 000	2000	30
4	17	30 000	2000	0
5	17	15 000	1000	15
6	15	25 000	2000	15
7	19	25 000	3000	30
8	17	30 000	1000	15
9	15	15 000	1000	0
10	19	30 000	3000	30
11	19	25 000	2000	15
12	15	25 000	1000	30
13	17	30 000	2000	15
14	19	25 000	2000	0
15	17	25 000	2000	0
16	19	25 000	1000	30
17	15	30 000	3000	15
18	15	25 000	3000	30
19	19	30 000	3000	15
20	19	15 000	1000	30
21	15	30 000	3000	0
22	19	15 000	2000	30
23	19	15 000	3000	0
24	17	15 000	1000	30
25	15	15 000	1000	30
26	17	25 000	3000	30
27	19	30 000	1000	0
28	17	30 000	3000	30
29	19	25 000	2000	30
30	15	15 000	2000	30
31	19	15 000	2000	0
32	15	30 000	1000	15
33	15	25 000	3000	15
34	15	15 000	3000	15
35	17	25 000	3000	15
36	17	15 000	3000	0
37	15	15 000	3000	0

38	17	15 000	3000	15
39	17	25 000	2000	30
40	17	15 000	2000	0
41	15	15 000	2000	0
42	19	25 000	1000	15
43	19	25 000	1000	0
44	15	30 000	2000	15
45	15	25 000	1000	15
46	15	25 000	2000	0
47	15	25 000	2000	30
48	17	25 000	1000	0
49	17	30 000	2000	30
50	15	15 000	1000	15
51	17	15 000	3000	30
52	15	30 000	1000	0
53	19	15 000	3000	30
54	17	25 000	1000	15
55	19	30 000	1000	15
56	17	25 000	2000	15
57	19	30 000	2000	15
58	15	25 000	1000	0
59	19	25 000	3000	15
60	19	15 000	2000	15
61	15	30 000	3000	30
62	19	15 000	1000	0
63	19	30 000	1000	30
64	17	25 000	1000	30
65	17	30 000	1000	30
66	17	30 000	1000	0
67	15	30 000	1000	30
68	19	30 000	2000	0
69	15	15 000	2000	15
70	17	15 000	2000	30
71	19	25 000	3000	0
72	15	30 000	2000	0
73	17	15 000	1000	0
74	15	15 000	3000	30
75	17	15 000	2000	15
76	17	30 000	3000	0
77	19	30 000	2000	30
78	19	30 000	3000	0

79	17	30 000	3000	15
80	19	15 000	1000	15
81	19	15 000	3000	15

4.5 Análise da qualidade dos códigos

A análise da qualidade dos códigos, realizou-se segundo a norma ISO/IEC 29158:2020 recorrendo, como referido anteriormente, a um verificador próprio para o efeito. A necessidade de aquisição deste equipamento deu-se pela crescente quantidade de reclamações dos clientes devido ao incumprimento dos requisitos de qualidade especificados. A Bosch necessitava de enviar constantemente peças para analisar para uma empresa sediada na Alemanha, denominada CSG Computersysteme GmbH. Por este motivo, a equipa decidiu pesquisar soluções no mercado e adquirir um equipamento próprio para alocar ao laboratório de engenharia da qualidade, de forma a tornar mais eficiente o processo de análise dos códigos.

Neste estudo analisaram-se todos os códigos marcados (QR1, QR2, QR3 e DMC) nas 81 peças, perfazendo um total de 324 análises. As imagens captadas pelo verificador encontram-se no Anexo E. Todos os códigos, mesmo os que apresentam qualidade F, foram possíveis de descodificar, pelo que se obteve um resultado positivo de *Decodability* em todos os DMCs e QRs.

Na Figura 35 e Figura 36, encontram-se dois exemplos de análises de DMCs com qualidade A e F, respetivamente, obtidos por intermédio do verificador de códigos. Tal como referido no capítulo 2.2.2, mais propriamente após a Tabela 8, a classe de qualidade global atribuída a um código corresponde à mínima de todas as características avaliadas. No exemplo da Figura 35, amostra 63, apresenta-se um DMC com qualidade A (4.0) em todas as suas características, por esta razão a sua classificação de qualidade global é A (4.0). Opostamente, no exemplo da Figura 36, amostra 37, apresenta-se um DMC com uma classificação de qualidade global F (0.0), pois possui um valor de refletância de 4% para um requisito mínimo de 5%, sendo por esta razão avaliado com F (0.0) nesta característica. Ainda que o *Cell Modulation (CM)* seja avaliado com 2.0 (C), o *Fixed Pattern Damage (FPD)* com 3.0 (B) e as restantes características com 4.0 (A), a classe de qualidade global atribuída a este código é F (0.0), pois está limitada à classificação mais baixa de todas as características avaliadas.

Realizada a análise a todos os códigos com o verificador, exportaram-se os resultados obtidos para Excel®, tendo-se tratado e correlacionado os mesmos no *software* Minitab®.

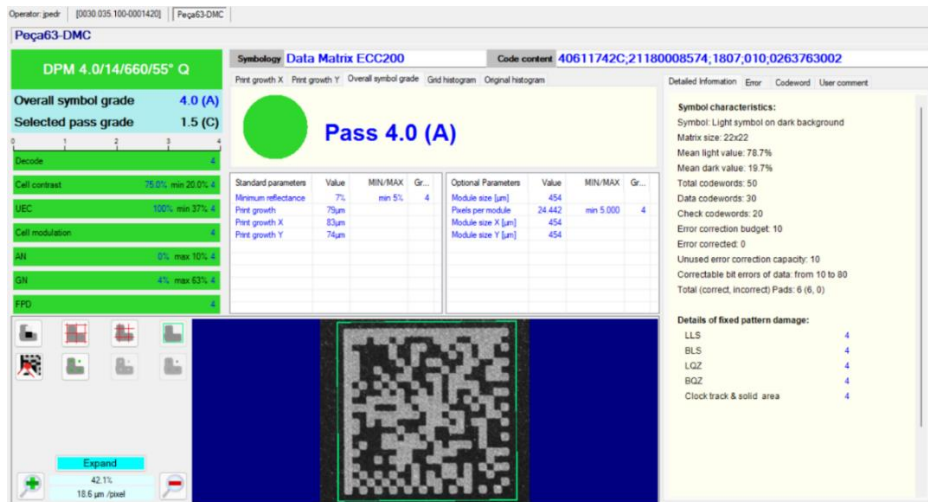


Figura 35 - Exemplo de um DMC com qualidade A

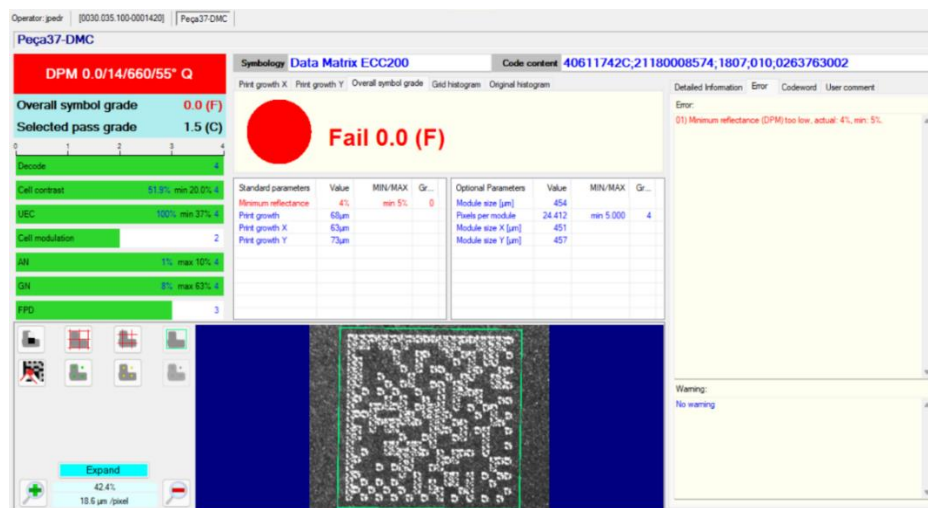


Figura 36 - Exemplo de um DMC com qualidade F

4.6 Análise estatística das amostras DMC

A aplicação do planeamento de experiências do tipo fatorial completo nos ensaios efetuados com o *software* Minitab®, permite a obtenção de análises gráficas e numéricas, sobre o melhor conjunto de parâmetros de marcação *laser*, com os resultados da análise de qualidade efetuada com o verificador de códigos.

Através do gráfico de Pareto dos efeitos padronizados, é possível observar os parâmetros ou fatores mais significativos para a qualidade (*Grade*) do DMC na sua globalidade, com um nível de confiança de 95% (Figura 37). Por ordem decrescente de importância, os parâmetros são: velocidade de marcação, frequência de impulso e potência da radiação. A sobreposição de passagem também contribui, embora não significativamente.

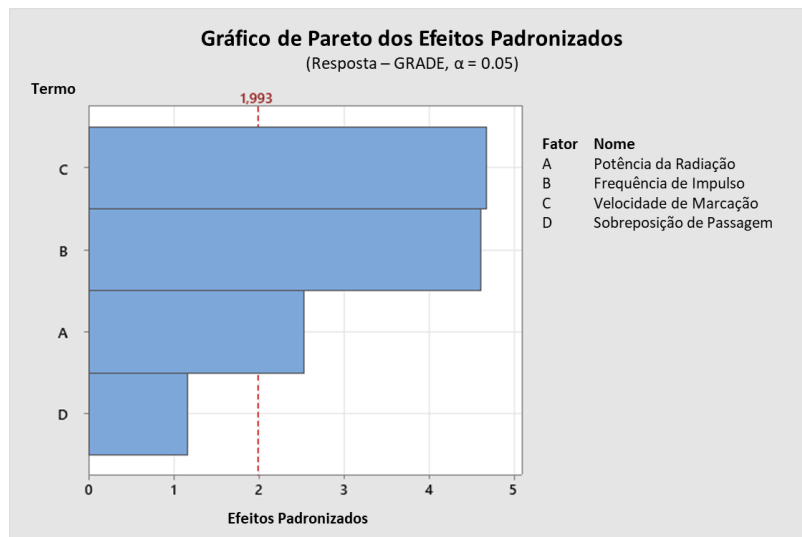


Figura 37 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o Grade do DMC

A Figura 38, trata-se de um gráfico de efeitos principais, que indica os parâmetros para obtenção dos melhores resultados de qualidade do DMC. Constata-se que o melhor conjunto de parâmetros de marcação *laser* para que a qualidade seja maximizada são:

- Potência da Radiação - 19 W;
- Frequência de Impulso - 30 000 Hz;
- Velocidade de Marcação - 1000 mm/s;
- Sobreposição de Passagem - 30%.

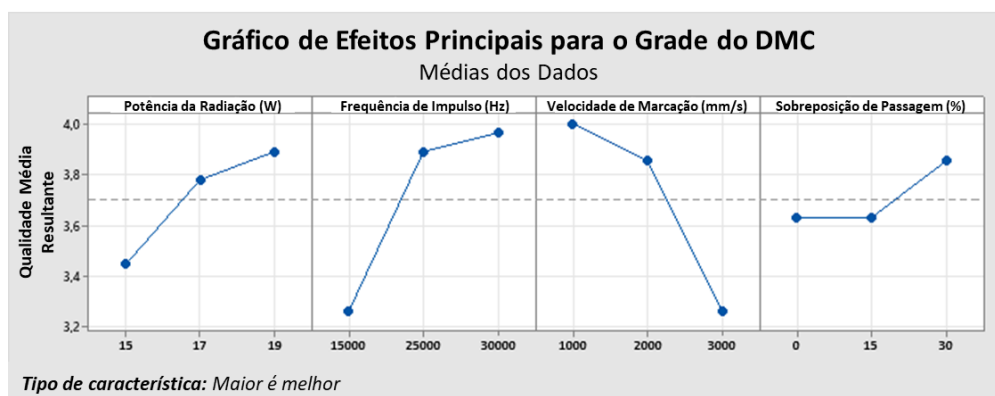


Figura 38 - Gráfico de efeitos principais para o Grade do DMC

Conforme abordado anteriormente no capítulo 2.2.2, são várias as características que afetam a qualidade final dos DMCs, por isso é importante analisar quais os parâmetros e níveis que afetam essas características de forma significativa.

No que diz respeito ao contraste (*Cell Contrast - CC*), o gráfico da Figura 39 diz-nos com um nível de confiança de 95%, que todos os parâmetros supracitados afetam o resultado, sendo a frequência de impulso e a velocidade de marcação os parâmetros com maior impacto no resultado do CC.

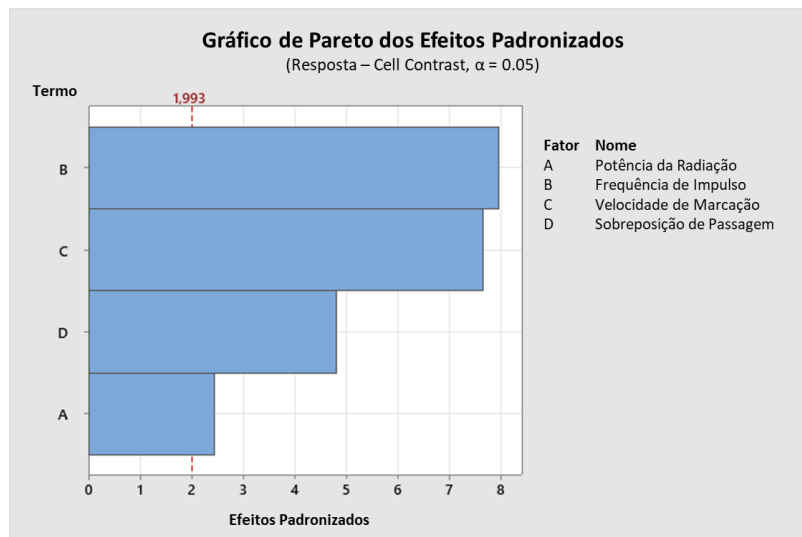


Figura 39 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o CC do DMC

O gráfico da Figura 40, mostra os parâmetros para obtenção dos melhores resultados no CC do DMC. Constata-se que o melhor conjunto de parâmetros de marcação *laser* para que o CC seja maximizado são:

- Potência da Radiação - 19 W;
- Frequência de Impulso - 30 000 Hz;
- Velocidade de Marcação - 1000 mm/s;
- Sobreposição de Passagem - 30%.

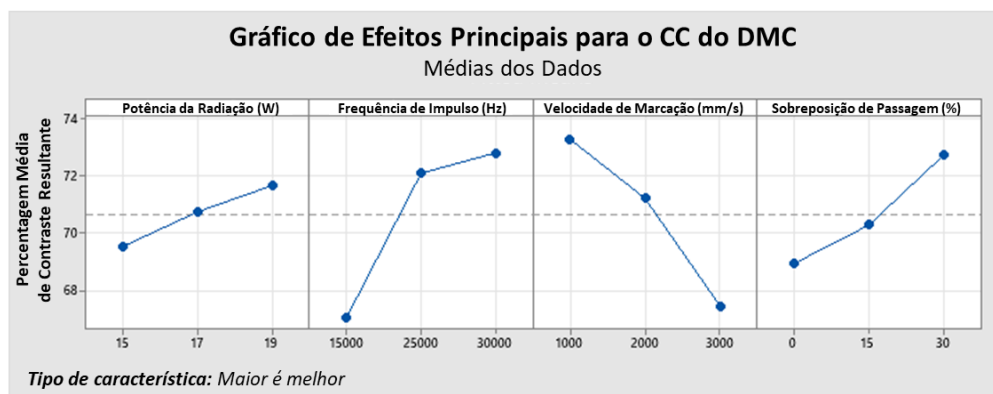


Figura 40 - Gráfico de efeitos principais para o CC do DMC

Relativamente à modulação (*Cell Modulation - CM*), o gráfico da Figura 41 diz-nos com um nível de confiança de 95%, que a frequência de impulso e a velocidade de marcação são os parâmetros com maior impacto na obtenção de resultados consistentes de reflexão dos elementos claros e escuros do código. Os restantes parâmetros também contribuem, mas não de forma significativa.

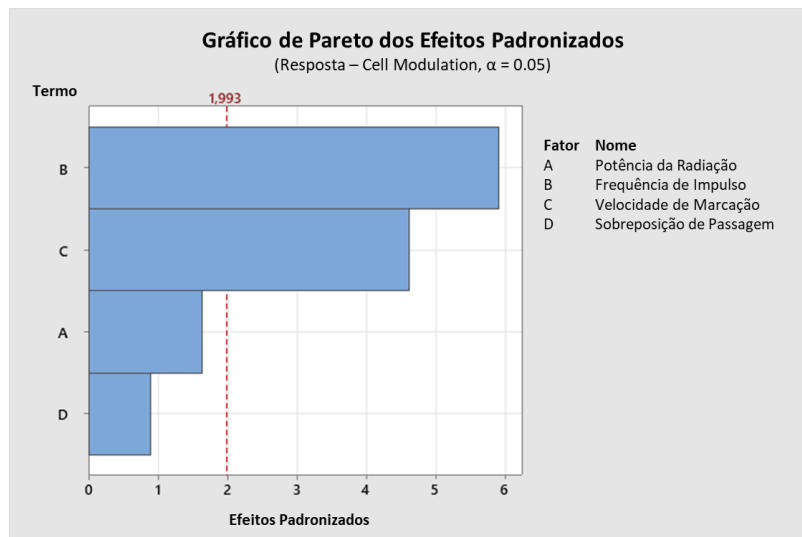


Figura 41 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o CM do DMC

A Figura 42 indica os melhores parâmetros relativamente aos resultados do CM do DMC. Verifica-se que o melhor conjunto de parâmetros de marcação *laser* para que o CM seja maximizado são:

- Potência da Radiação - 19 W;
- Frequência de Impulso - 30 000 Hz;
- Velocidade de Marcação - 1000 mm/s;
- Sobreposição de Passagem - 15% ou 30%.

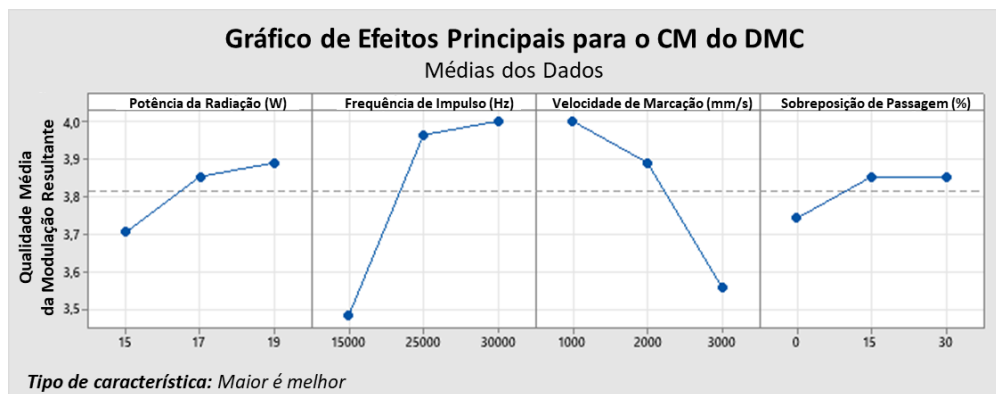


Figura 42 - Gráfico de efeitos principais para o CM do DMC

Quanto aos danos existentes no DMC (*Fixed Pattern Damage - FPD*), o gráfico da Figura 43 reflete, com um nível de confiança de 95%, que a velocidade de marcação, frequência de impulso e potência da radiação são, por ordem decrescente de importância, os parâmetros que mais contribuem para que o código não possua lacunas. A sobreposição de passagem contribui, mas não significativamente.

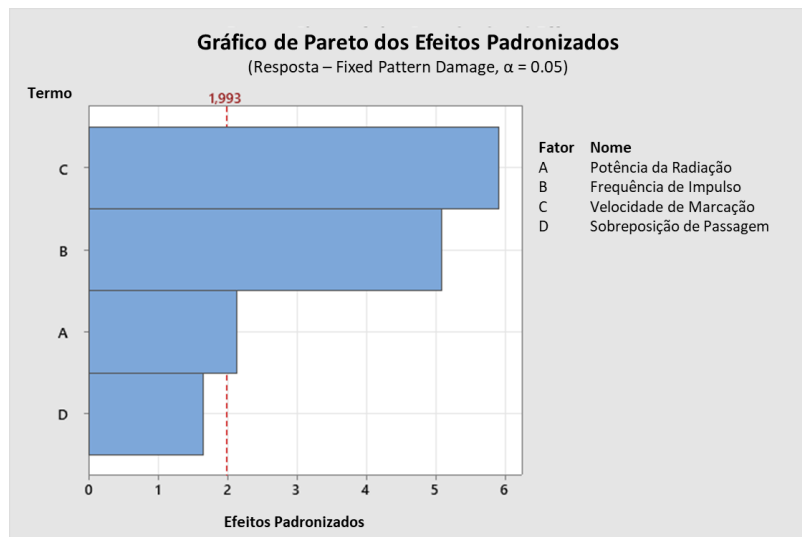


Figura 43 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o FPD do DMC

O gráfico de efeitos principais da Figura 44 indica os melhores parâmetros relativamente aos resultados do FPD do DMC. Comprova-se que o melhor conjunto de parâmetros de marcação *laser* para que o FPD seja maximizado são:

- Potência da Radiação - 19 W;
- Frequência de Impulso - 30 000 Hz;
- Velocidade de Marcação - 1000 mm/s;
- Sobreposição de Passagem - 30%.

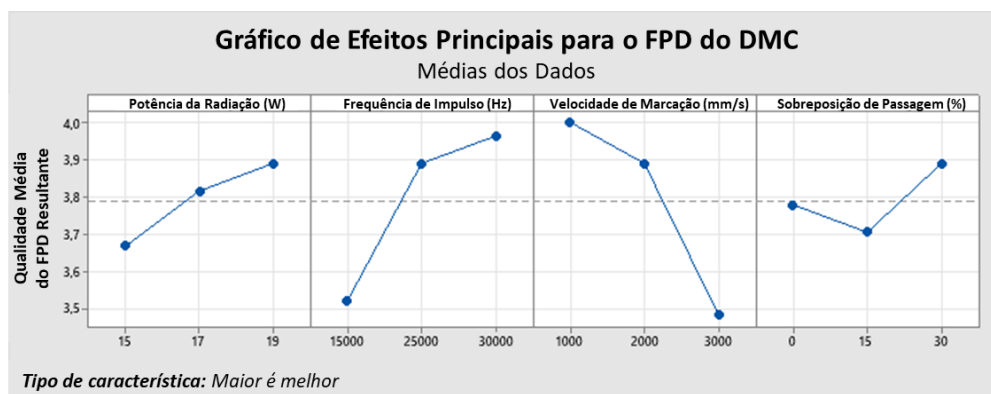


Figura 44 - Gráfico de efeitos principais para o FPD do DMC

No que concerne à não-uniformidade axial (*Axial Non-Uniformity - ANU*) do DMC, os resultados indicam que os códigos resultantes do processo de marcação têm as dimensões segundo o eixo X dos módulos individuais muito semelhantes às dimensões segundo o eixo Y, o que indica que não existe movimento da peça enquanto a mesma é marcada. O gráfico da Figura 45 comprova com um nível de confiança de 95%, que para esta característica dos códigos, os parâmetros supracitados não contribuem significativamente para que o código possua homogeneidade em ambos os eixos, mas sim a fixação da peça durante a marcação.

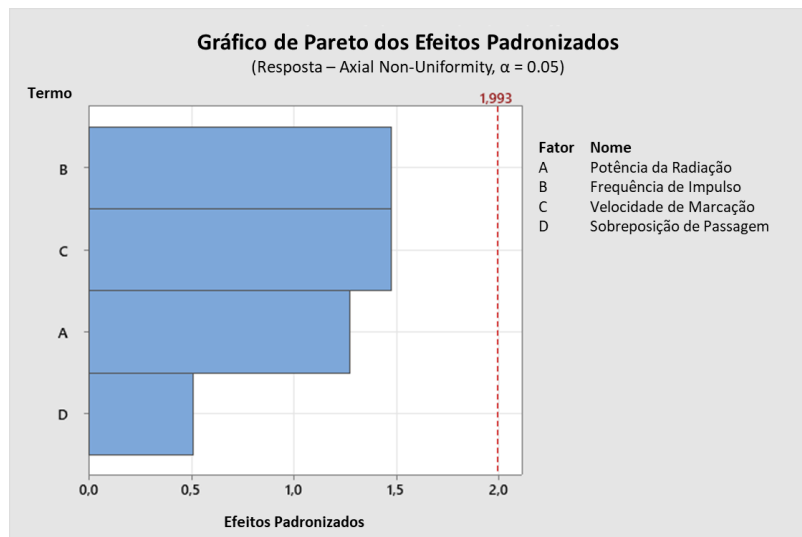


Figura 45 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o ANU do DMC

Em relação ao desvio de posicionamento de um módulo relativamente à posição teórica considerada como ideal (*Grid Non-Uniformity - GNU*), o gráfico da Figura 46 mostra, com um nível de confiança de 95%, que a frequência de impulso e a velocidade de marcação são os parâmetros que mais contribuem para que os módulos não sejam marcados na posição teórica.

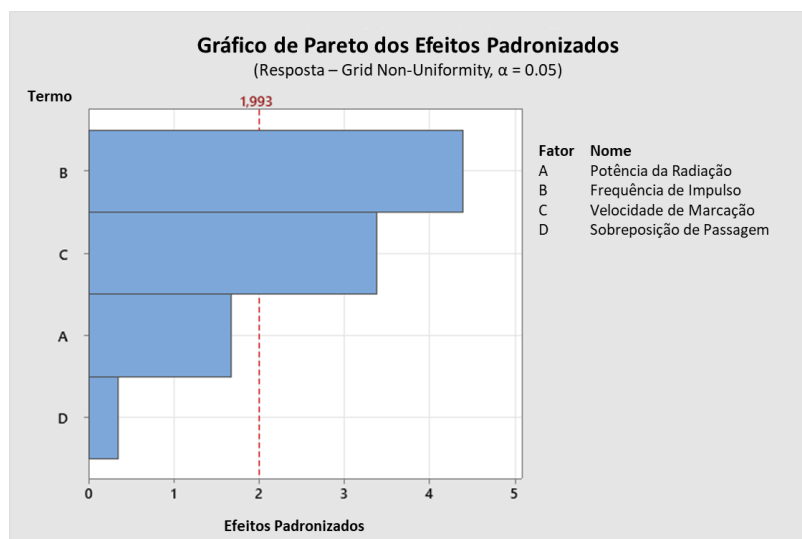


Figura 46 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o GNU do DMC

A partir do gráfico da Figura 47, é possível concluir que o melhor conjunto de parâmetros de marcação *laser* para que a GNU seja minimizada são:

- Potência da Radiação - 17 W;
- Frequência de Impulso - 30 000 Hz;
- Velocidade de Marcação - 1000 mm/s;
- Sobreposição de Passagem - 0%.

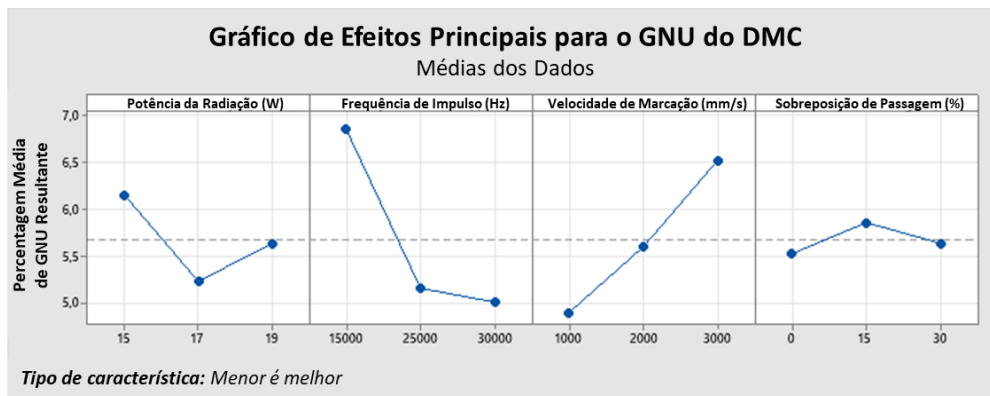


Figura 47 - Gráfico de efeitos principais para o GNU do DMC

4.6.1 Análise de Variância (ANOVA)

Com o *software* Minitab®, é também possível obter uma análise de variância dos resultados. Esta análise permite determinar a importância de cada parâmetro para os resultados das várias características dos DMCs e QRs, e verificar a sua dispersão.

A ANOVA indica a percentagem de contribuição de cada parâmetro através do valor- p , ou probabilidade de significância. Quanto menor a 0,05 for o valor- p , significa que esta condição, neste caso o parâmetro de marcação *laser*, está a contribuir com maior impacto. É possível também analisar se o modelo de ensaios é o adequado, através da linha de tendência com o coeficiente de correlação (R^2). Este valor situa-se entre 0% e 100% e, quanto mais perto estiver de 100%, mais fiável é o modelo.

No gráfico da Figura 48, observa-se a linha de tendência dos resultados do CC. Alguns valores encontram-se afastados da linha média, influenciando negativamente o valor de R^2 .

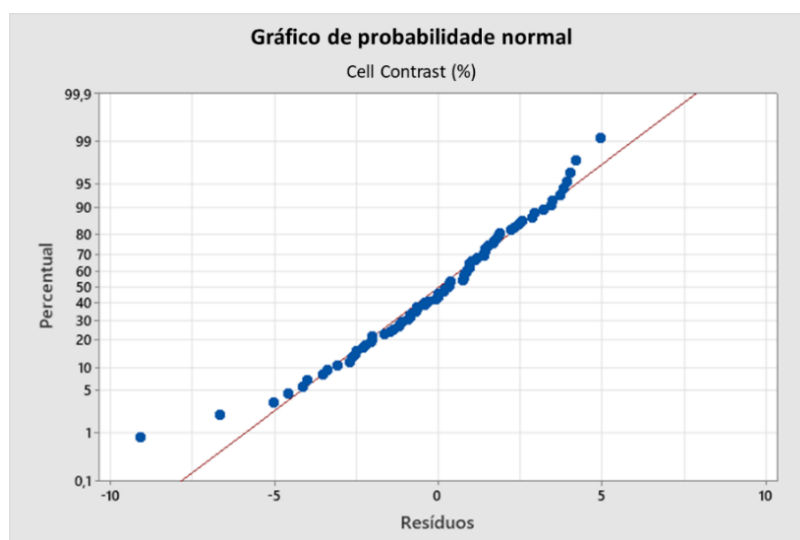


Figura 48 - Linha de tendência dos resultados do CC

A Tabela 19 indica que apesar de todos os parâmetros supracitados afetarem significativamente os resultados do CC (valores- p inferiores a 0,05), a potência da

radiação é o parâmetro com menor contribuição entre estes, com o valor- p mais elevado, de 0,018. Nesta tabela, o valor- p mais baixo é de 0,000, referente à frequência de impulso, velocidade de marcação e sobreposição de passagem, o que indica que estes parâmetros contribuem de forma mais significativa para esta característica. O valor de R^2 é de 75,97%, mostrando que o modelo ainda pode ser melhorado, para ser considerado ideal.

Tabela 19 - Resultados estatísticos dos valores do CC

Parâmetro	Valor- p	R^2
Potência da radiação (W)	0,018	75,97%
Frequência de impulso (Hz)	0,000	
Velocidade de marcação (mm/s)	0,000	
Sobreposição de passagem (%)	0,000	

Na Figura 49 está presente a linha de tendência do CM. Alguns valores encontram-se afastados da linha média. Esse afastamento afeta o R^2 , que é de 55,23% (Tabela 20), cerca de metade do valor do modelo ideal que se situa nos 100%, indicando que o modelo pode ser melhorado. Um valor tão baixo de fiabilidade pode estar relacionado com o facto de muitos resultados estarem afastados da linha média e muito dispersos entre si.

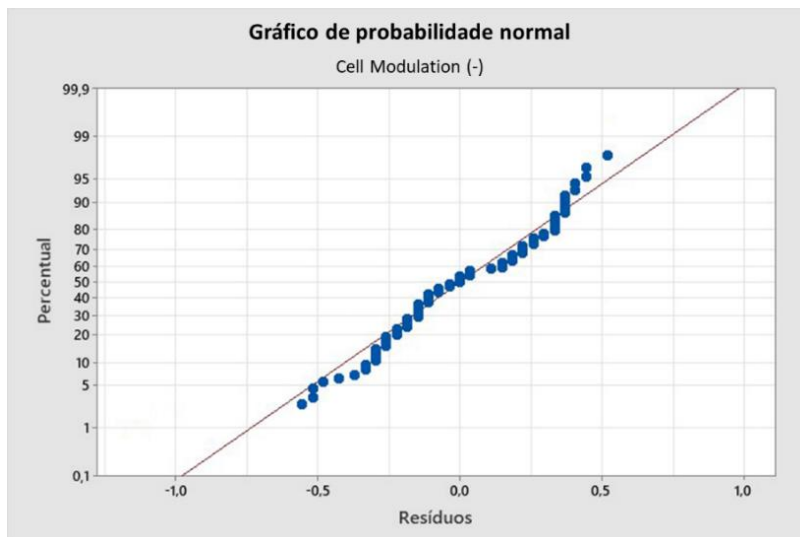


Figura 49 - Linha de tendência dos resultados do CM

A Tabela 20 indica que a sobreposição de passagem e a potência da radiação não contribuem de forma significativa para os resultados do CM, pois possuem valores- p elevados e iguais a 0,376 e 0,106, respetivamente. Observe-se ainda que, nesta tabela, o valor- p mais baixo é de 0,000, relativo à frequência de impulso e velocidade de marcação, o que indica que estes parâmetros contribuem de forma significativa para esta característica.

Tabela 20 - Resultados estatísticos dos valores do CM

Parâmetro	Valor-p	R^2
Potência da radiação (W)	0,106	55,23%
Frequência de impulso (Hz)	0,000	
Velocidade de marcação (mm/s)	0,000	
Sobreposição de passagem (%)	0,376	

Na Figura 50 encontra-se a linha de tendência do FPD, onde existem também alguns valores afastados da linha média. Esse afastamento faz com que R^2 seja reduzido e perca fiabilidade, atingindo um valor de 60,44% que evidencia que existe possibilidade de melhorar o modelo.

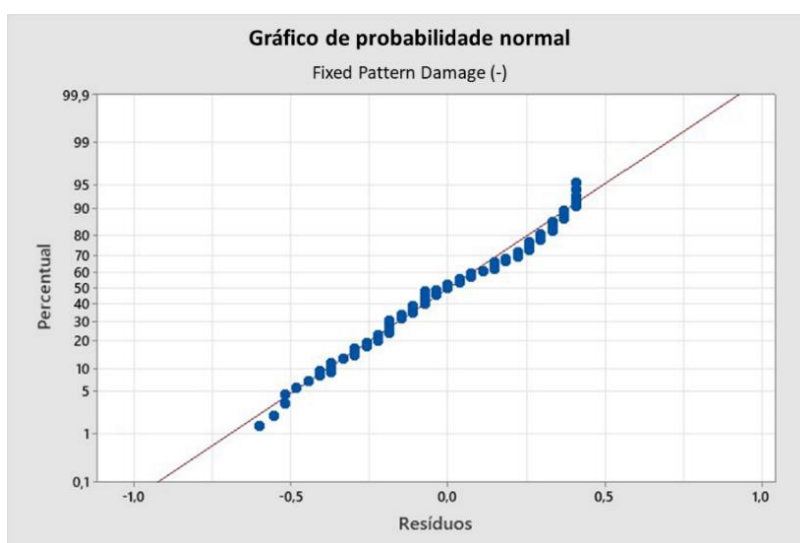


Figura 50 - Linha de tendência dos resultados do FPD

Na Tabela 21 é possível observar que a sobreposição de passagem não contribui de forma significativa para os resultados do FPD, pois tem um valor-p elevado e igual a 0,103. O valor-p mais baixo desta tabela é de 0,000, relativo à frequência de impulso e velocidade de marcação, o que demonstra que estes parâmetros contribuem de forma mais significativa para esta característica, comparativamente à potência da radiação com valor-p igual a 0,037.

Tabela 21 - Resultados estatísticos dos valores do FPD

Parâmetro	Valor-p	R^2
Potência da radiação (W)	0,037	60,44%
Frequência de impulso (Hz)	0,000	
Velocidade de marcação (mm/s)	0,000	
Sobreposição de passagem (%)	0,103	

Na Figura 51 encontra-se a linha de tendência do ANU. A elevada dispersão dos valores e afastamento dos mesmos em relação à média, faz com que R^2 seja muito reduzido, atingindo um resultado de apenas 14,41%.

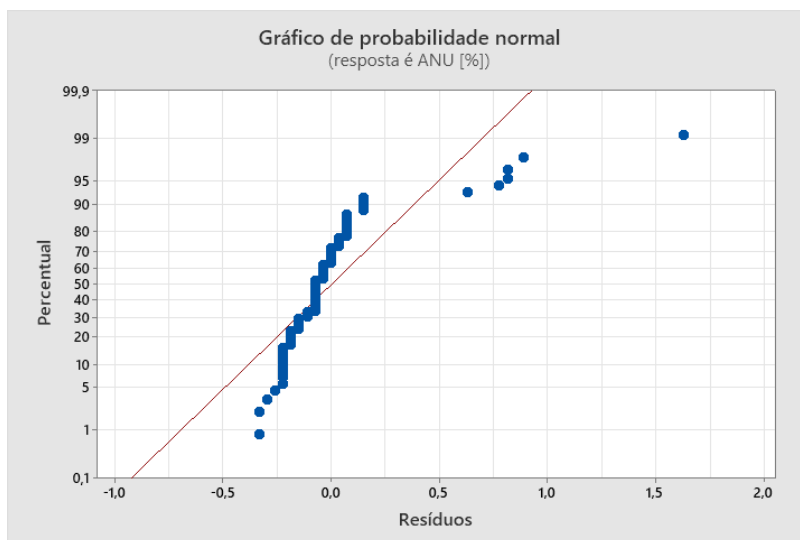


Figura 51 - Linha de tendência dos resultados do ANU

Conforme referido anteriormente, na Tabela 22 comprova-se que a ANU não está diretamente relacionada com os parâmetros de marcação, mas sim com a fixação da peça durante a marcação, pois nenhum dos valores- p é inferior a 0,05.

Tabela 22 - Resultados estatísticos dos valores do ANU

Parâmetro	Valor- p	R^2
Potência da radiação (W)	0,207	14,41%
Frequência de impulso (Hz)	0,146	
Velocidade de marcação (mm/s)	0,146	
Sobreposição de passagem (%)	0,612	

Na Figura 52 está a linha de tendência do GNU. Obteve-se, conforme a Tabela 23, um valor de R^2 igual a 60,75%, mostrando que existe margem para melhorar o modelo.

Na Tabela 23 é possível observar que a sobreposição de passagem e a potência da radiação, não contribuem de forma significativa para os resultados do GNU, pois têm valores- p elevados, iguais a 0,728 e 0,099, respetivamente. Observe-se ainda que, nesta tabela, os valores- p mais baixos são de 0,000 e 0,001, referentes à frequência de impulso e velocidade de marcação, respetivamente, indicando que estes parâmetros contribuem de forma significativa para esta característica.



Figura 52 - Linha de tendência dos resultados do GNU

Tabela 23 - Resultados estatísticos dos valores do GNU

Parâmetro	Valor-p	R ²
Potência da radiação (W)	0,099	60,75%
Frequência de impulso (Hz)	0,000	
Velocidade de marcação (mm/s)	0,001	
Sobreposição de passagem (%)	0,728	

Na Tabela 24 e Tabela 25 encontram-se as melhores condições de marcação *laser*, resultantes das análises do DoE fatorial e a ANOVA para o DMC.

Tabela 24 - Melhores condições de marcação *laser*, pelo DoE fatorial

DoE Fatorial			
Melhores condições de marcação - resultados da qualidade no global			
Potência da radiação (W)	Frequência de impulso (Hz)	Velocidade de marcação (mm/s)	Sobreposição de passagem (%)
19 (P _s)	30 000 (F _s)	1000 (V _i)	30 (S _s)
Melhores condições de marcação - resultados do CC, CM, FPD			
Potência da radiação (W)	Frequência de impulso (Hz)	Velocidade de marcação (mm/s)	Sobreposição de passagem (%)
19 (P _s)	30 000 (F _s)	1000 (V _i)	30 (S _s)

Melhores condições de marcação - resultados do GNU

Potência da radiação (W)	Frequência de impulso (Hz)	Velocidade de marcação (mm/s)	Sobreposição de passagem (%)
17 (P _n)	30 000 (F _s)	1000 (V _i)	0 (S _i)

Tabela 25 - Melhores parâmetros de marcação *laser*, pela análise de variância

ANOVA

Parâmetros de marcação mais significativos - resultados do CC

Frequência de impulso (Hz), velocidade de marcação (mm/s),
sobreposição de passagem (%)

Parâmetros de marcação mais significativos - resultados do CM, FPD, GNU

Frequência de impulso (Hz), velocidade de marcação (mm/s)

4.7 Análise estatística das amostras QR

No caso do QR, utilizou-se como referência para a análise estatística apenas os códigos marcados na posição número 2 (QR2), por se tratar de uma zona onde não existem machas na superfície.

O gráfico de Pareto dos efeitos padronizados da Figura 53 indica-nos, com um nível de confiança de 95%, que os parâmetros ou fatores mais significativos para a qualidade (*Grade*) na sua globalidade, são a frequência de impulso e a velocidade de marcação. A sobreposição de passagem e a potência da radiação também contribuem, embora não significativamente.

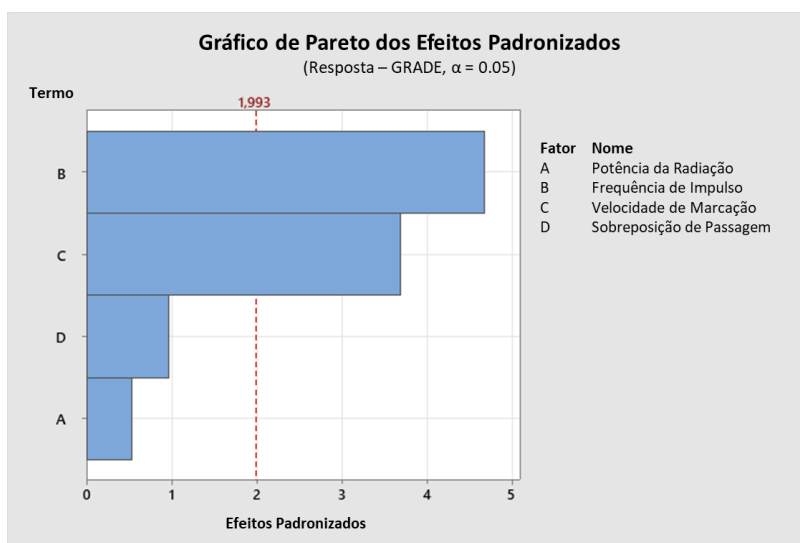


Figura 53 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o Grade do QR

O gráfico de efeitos principais da Figura 54 indica que o melhor conjunto de parâmetros de marcação *laser* para que a qualidade do QR seja maximizada são:

- Potência da Radiação - 17 W;
- Frequência de Impulso - 25 000 Hz;
- Velocidade de Marcação - 2000 mm/s;
- Sobreposição de Passagem - 30%.

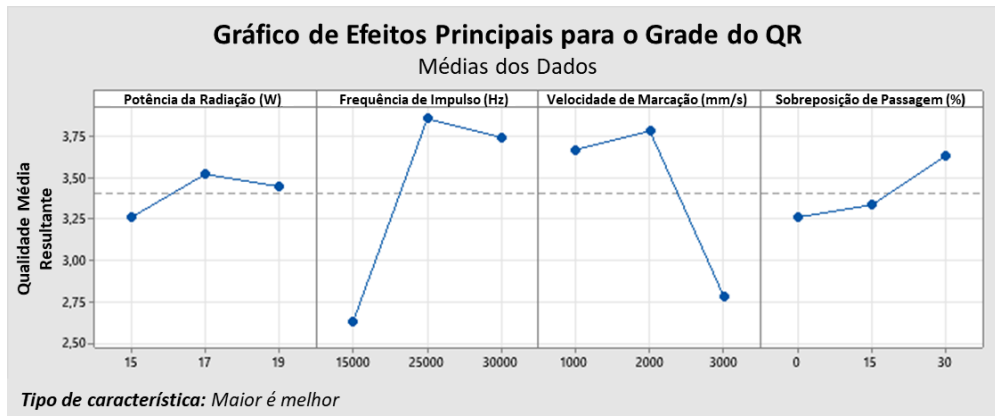


Figura 54 - Gráfico de efeitos principais para o Grade do QR

No que diz respeito ao CC do QR, o gráfico da Figura 55, mostra com um nível de confiança de 95%, que os parâmetros velocidade de marcação, frequência de impulso e potência da radiação são os parâmetros com maior impacto no resultado do CC. A sobreposição de passagem não afeta significativamente o resultado do CC.

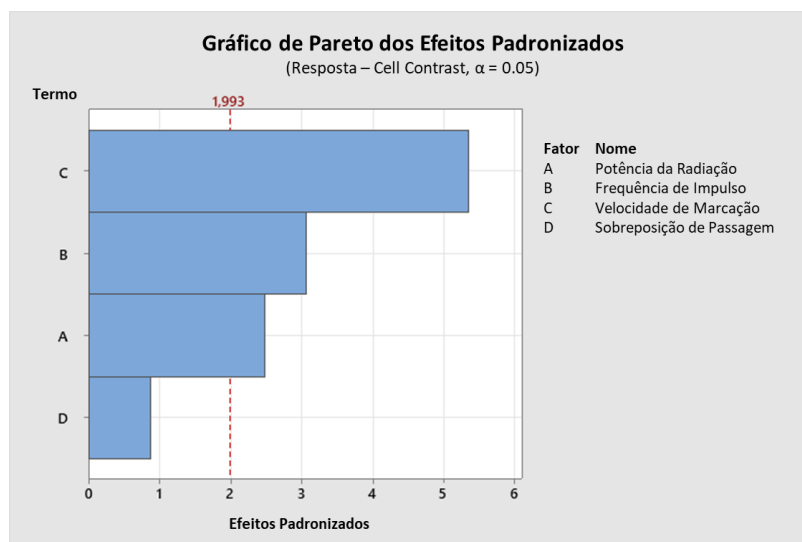


Figura 55 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o CC do QR

Na Figura 56 encontram-se os resultados do CC do QR para os vários parâmetros de marcação em estudo e os seus níveis. Conclui-se que o melhor conjunto de parâmetros de marcação *laser* para que o CC seja maximizado são:

- Potência da Radiação - 15 W;

- Frequência de Impulso - 15 000 Hz;
- Velocidade de Marcação - 2000 mm/s;
- Sobreposição de Passagem - 30%.

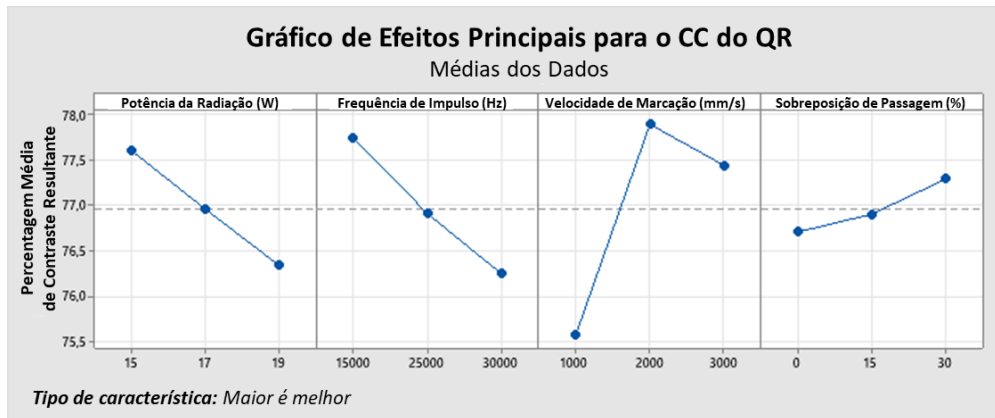


Figura 56 - Gráfico de efeitos principais para o CC do QR

Relativamente ao CM, o gráfico da Figura 57 diz-nos com um nível de confiança de 95%, que a frequência de impulso e a velocidade de marcação são os parâmetros com maior impacto na obtenção de resultados consistentes de reflexão dos elementos claros e escuros do código. Os restantes parâmetros também contribuem, mas não de forma significativa.

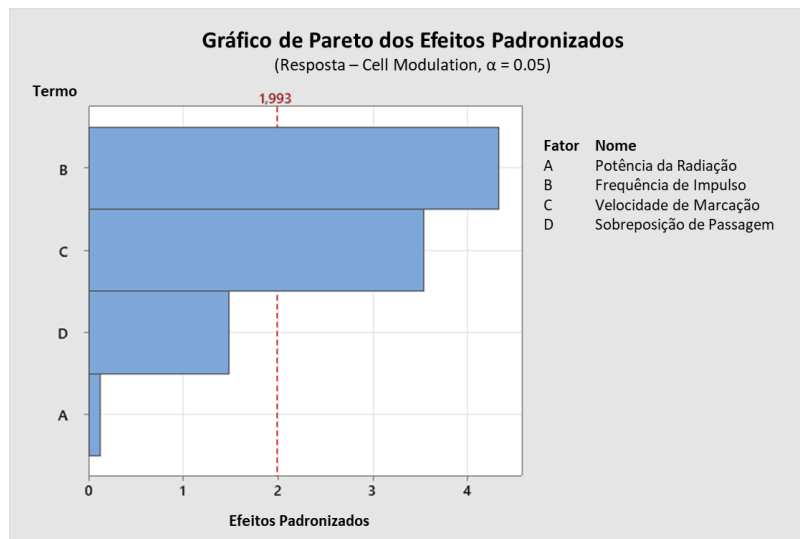


Figura 57 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o CM do QR

No gráfico da Figura 58, encontram-se os melhores parâmetros relativamente aos resultados do CM do QR. Prova-se que, o melhor conjunto de parâmetros de marcação *laser* para que o CM seja maximizado são:

- Potência da Radiação - 17 W;
- Frequência de Impulso - 25 000 Hz;
- Velocidade de Marcação - 2000 mm/s;
- Sobreposição de Passagem - 30%.

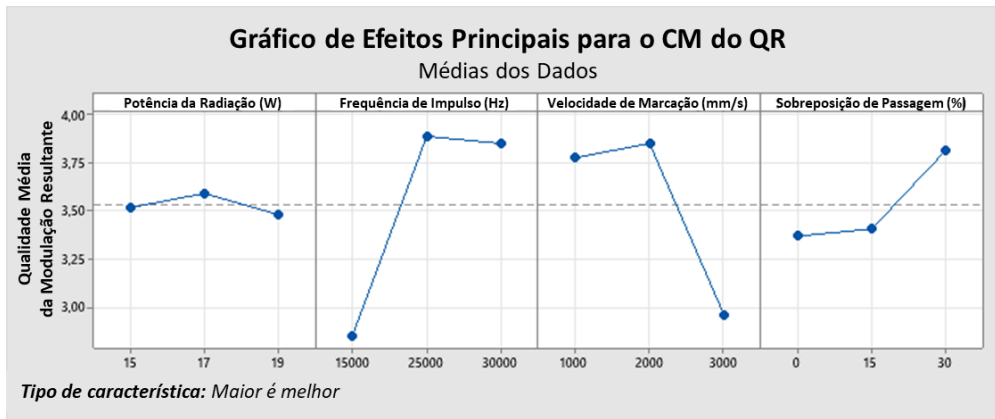


Figura 58 - Gráfico de efeitos principais para o CM do QR

Quanto ao FPD do QR, o gráfico da Figura 59 reflete, com um nível de confiança de 95%, que a frequência de impulso e a velocidade de marcação são os parâmetros que mais contribuem para que o código não possua lacunas. A sobreposição de passagem e a potência da radiação contribuem, mas não significativamente.

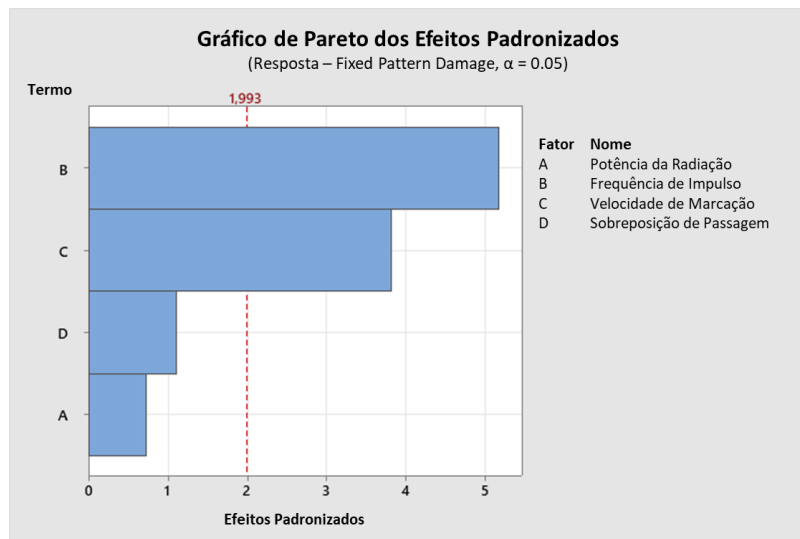


Figura 59 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o FPD do QR

A Figura 60, trata-se de um gráfico de efeitos principais que indica que o melhor conjunto de parâmetros de marcação *laser* para que o FPD seja maximizado são:

- Potência da Radiação - 19 W;
- Frequência de Impulso - 25 000 Hz;
- Velocidade de Marcação - 1000 ou 2000 mm/s;
- Sobreposição de Passagem - 30%.

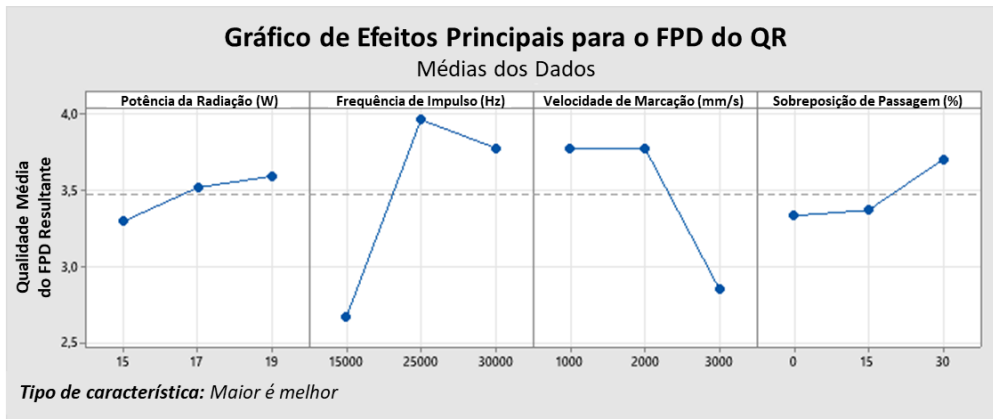


Figura 60 - Gráfico de efeitos principais para o FPD do QR

À semelhança do DMC, no que concerne ao ANU do QR, os resultados indicam que os códigos resultantes do processo de marcação têm as dimensões segundo o eixo X dos módulos individuais muito semelhantes às dimensões segundo o eixo Y, o que indica que não existe movimento da peça enquanto a mesma é marcada.

O gráfico da Figura 61 comprova com um nível de confiança de 95%, que para esta característica dos códigos, os parâmetros supracitados não contribuem significativamente para que o código possua homogeneidade em ambos os eixos, mas sim a fixação da peça durante a marcação.

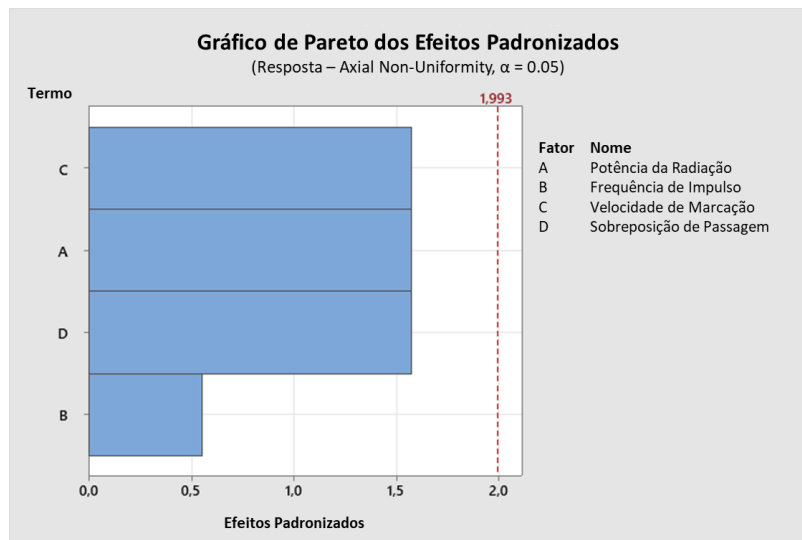


Figura 61 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o ANU do QR

Em relação ao GNU, o gráfico da Figura 62 indica, com um nível de confiança de 95%, que a sobreposição de passagem e a velocidade de marcação são os parâmetros que mais contribuem para que os módulos não sejam marcados na posição teórica.

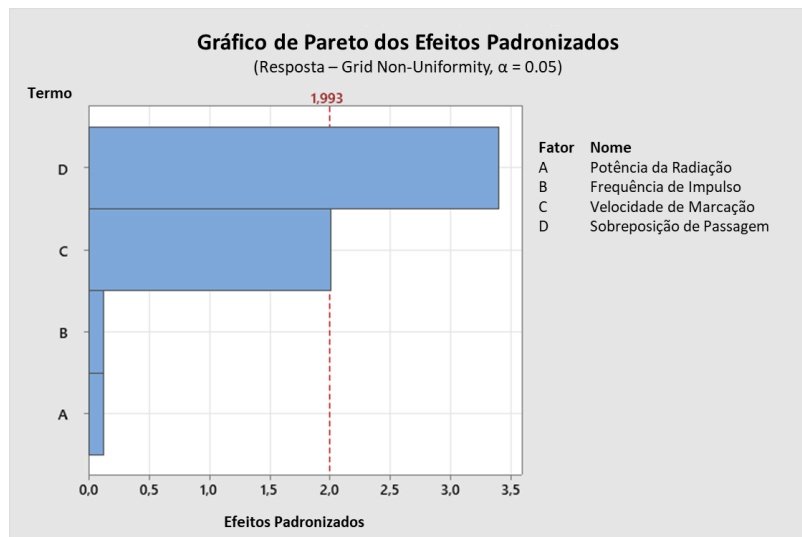


Figura 62 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o GNU do QR

Através do gráfico da Figura 63, é possível observar que o melhor conjunto de parâmetros de marcação *laser* para que a GNU seja minimizada são:

- Potência da Radiação - 17 W;
- Frequência de Impulso - 30 000 Hz;
- Velocidade de Marcação - 1000 mm/s;
- Sobreposição de Passagem - 30%.

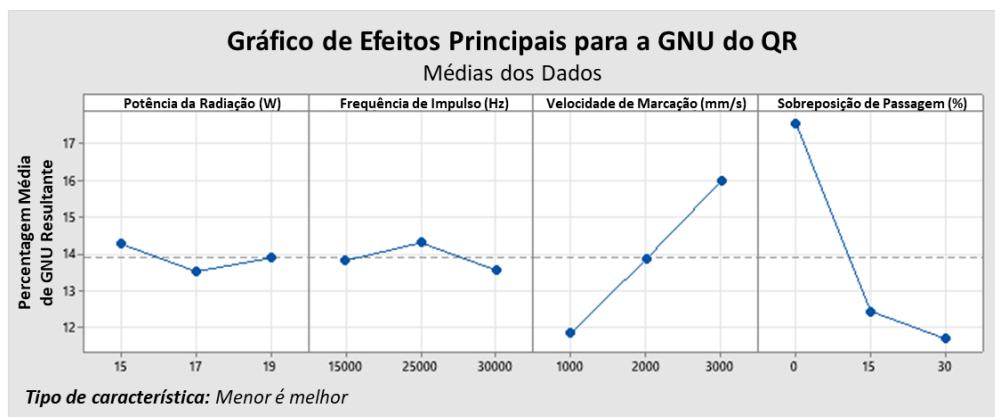


Figura 63 - Gráfico de efeitos principais para o GNU do QR

4.7.1 Análise de Variância (ANOVA)

A análise de variância mantém o mesmo pendur do estudo anterior, com o gráfico da linha de tendência, acompanhado de uma análise do valor- p , que indica a importância de cada parâmetro para os diferentes resultados.

No gráfico da Figura 64, observa-se a linha de tendência dos resultados do CC. Alguns valores encontram-se afastados da linha média, o que influencia negativamente o valor de R^2 .

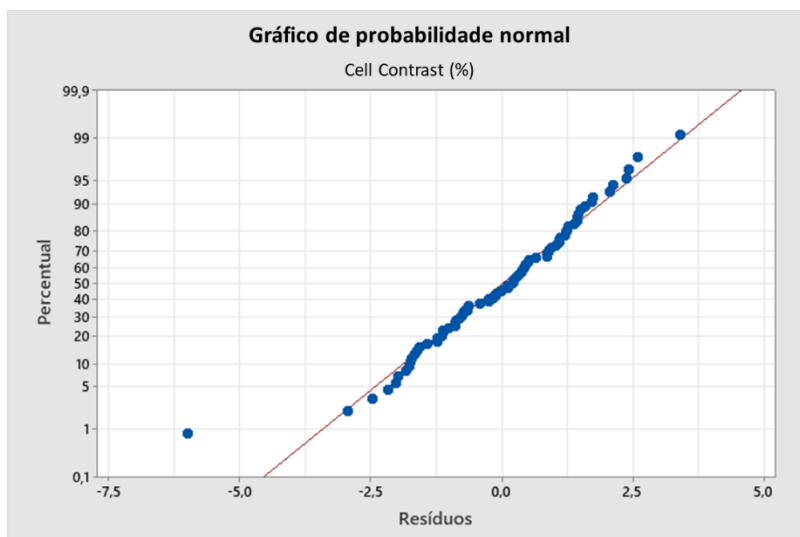


Figura 64 - Linha de tendência dos resultados do CC

A Tabela 26 demonstra que a sobreposição de passagem não contribui significativamente para os resultados do CC, pois apresenta o valor- p elevado e igual a 0,382. Observe-se ainda que, nesta tabela, o parâmetro que contribui mais significativamente para o resultado do CC é a velocidade de marcação, com o valor- p mais baixo de 0,000, seguido da frequência de impulso com valor- p igual a 0,003. O valor de R^2 é de 54,14%, indicando que é possível melhorar o modelo.

Tabela 26 - Resultados estatísticos dos valores do CC

Parâmetro	Valor- p	R^2
Potência da radiação (W)	0,015	54,14%
Frequência de impulso (Hz)	0,003	
Velocidade de marcação (mm/s)	0,000	
Sobreposição de passagem (%)	0,382	

Na Figura 65 encontra-se a linha de tendência do CM. Alguns valores mostram-se afastados da linha média, o que afeta o R^2 , que é cerca de 50,47%. Tal como referido anteriormente, um valor tão baixo de fiabilidade, pode estar relacionado com o facto de muitos resultados estarem afastados da linha média e muito dispersos entre si.

A Tabela 27, comprova que a potência da radiação e a sobreposição de passagem são parâmetros que não contribuem para os resultados do CM, pois apresentam os valores- p elevados e iguais a 0,900 e 0,142, respetivamente. Observe-se ainda, nesta tabela, que os valores- p mais baixos são de 0,000 e 0,001, relativos à frequência de impulso e velocidade de marcação, respetivamente, mostrando que estes parâmetros contribuem de forma mais significativa para esta característica.

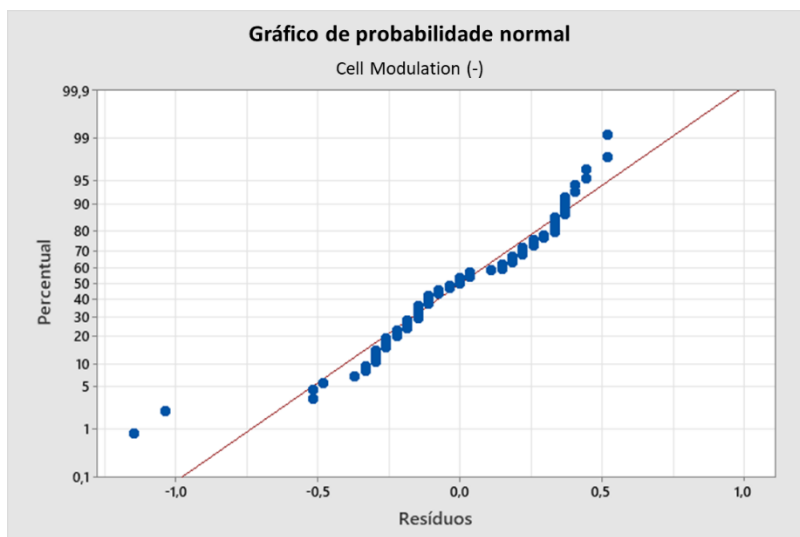


Figura 65 - Linha de tendência dos resultados do CM

Tabela 27 - Resultados estatísticos dos valores do CM

Parâmetro	Valor-p	R^2
Potência da radiação (W)	0,900	50,47%
Frequência de impulso (Hz)	0,000	
Velocidade de marcação (mm/s)	0,001	
Sobreposição de passagem (%)	0,142	

Na Figura 66 está a linha de tendência do FPD. Tal como no CM, alguns valores encontram-se afastados da linha média, o que afeta o R^2 , que é cerca de 49,86%. As causas de um valor tão baixo de fiabilidade, podem ser as mesmas mencionadas anteriormente.

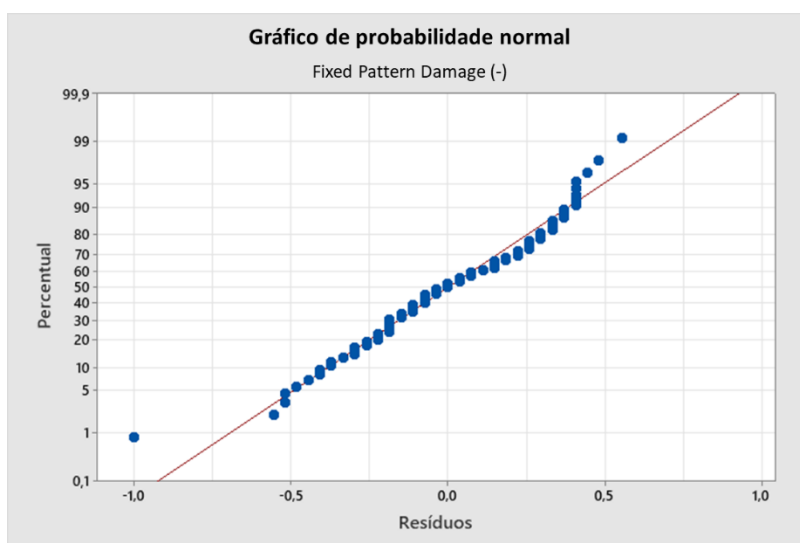


Figura 66 - Linha de tendência dos resultados do FPD

Na Tabela 28 é possível observar que a potência da radiação e a sobreposição de passagem não contribuem significativamente para os resultados do FPD, pois apresentam os valores- p elevados e iguais a 0,471 e 0,270, respetivamente. Nesta tabela, o valor- p mais baixo é de 0,000, relativo à frequência de impulso e velocidade de marcação, o que indica que estes parâmetros contribuem de forma mais significativa para esta característica.

Tabela 28 - Resultados estatísticos dos valores do FPD

Parâmetro	Valor- p	R^2
Potência da radiação (W)	0,471	
Frequência de impulso (Hz)	0,000	49,86%
Velocidade de marcação (mm/s)	0,000	
Sobreposição de passagem (%)	0,270	

Na Figura 67 encontra-se a linha de tendência do ANU. A elevada dispersão dos valores e afastamento dos mesmos em relação à média, faz com que R^2 seja muito reduzido, atingindo um resultado de apenas 16,46%.

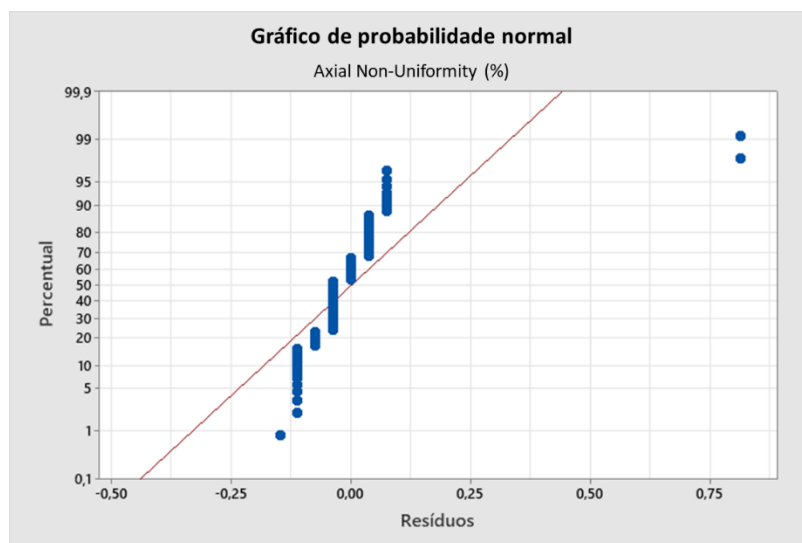


Figura 67 - Linha de tendência dos resultados do ANU

Conforme referido anteriormente, na Tabela 29 comprova-se que a ANU não está diretamente relacionada com os parâmetros de marcação, mas sim com a fixação da peça durante a marcação, pois nenhum dos valores- p é inferior a 0,05.

Tabela 29 - Resultados estatísticos dos valores do ANU

Parâmetro	Valor-p	R ²
Potência da radiação (W)	0,120	16,46%
Frequência de impulso (Hz)	0,582	
Velocidade de marcação (mm/s)	0,120	
Sobreposição de passagem (%)	0,120	

A linha de tendência do GNU, encontra-se presente na Figura 68. Assim como nas características anteriores, alguns valores encontram-se afastados da linha média e muito dispersos entre si, afetando o R², que neste caso é cerca de 45,09%.

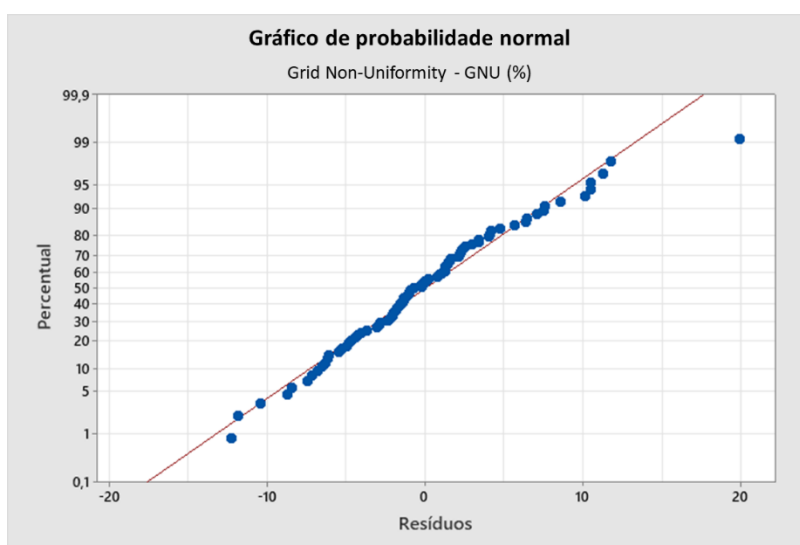


Figura 68 - Linha de tendência dos resultados do GNU

Na Tabela 30 é possível observar que a potência da radiação e a frequência de impulso, não contribuem significativamente para os resultados do GNU, com os valores-p elevados e iguais a 0,903 e 0,900, respetivamente. Observe-se ainda que, nesta tabela, os valores-p mais baixos são de 0,001 e 0,049, relativo à sobreposição de passagem e velocidade de marcação, respetivamente, demonstrando que estes parâmetros contribuem de forma mais significativa para esta característica. Na Tabela 31 e Tabela 32 encontram-se as melhores condições de marcação *laser*, resultantes das análises do DoE fatorial e a ANOVA para o QR.

Tabela 30 - Resultados estatísticos dos valores do GNU

Parâmetro	Valor-p	R ²
Potência da radiação (W)	0,903	45,09%
Frequência de impulso (Hz)	0,900	
Velocidade de marcação (mm/s)	0,049	
Sobreposição de passagem (%)	0,001	

Tabela 31 - Melhores condições de marcação *laser*, pelo DoE fatorial

DoE Fatorial			
Melhores condições de marcação - resultados da qualidade no global			
Potência da radiação (W)	Frequência de impulso (Hz)	Velocidade de marcação (mm/s)	Sobreposição de passagem (%)
17 (P _n)	25 000 (F _n)	2000 (V _n)	30 (S _s)
Melhores condições de marcação - resultados do CC			
Potência da radiação (W)	Frequência de impulso (Hz)	Velocidade de marcação (mm/s)	Sobreposição de passagem (%)
15 (P _i)	15 000 (F _i)	2000 (V _n)	30 (S _s)
Melhores condições de marcação - resultados do CM			
Potência da radiação (W)	Frequência de impulso (Hz)	Velocidade de marcação (mm/s)	Sobreposição de passagem (%)
17 (P _n)	25 000 (F _n)	2000 (V _n)	30 (S _s)
Melhores condições de marcação - resultados do FPD			
Potência da radiação (W)	Frequência de impulso (Hz)	Velocidade de marcação (mm/s)	Sobreposição de passagem (%)
19 (P _s)	25 000 (F _n)	1000 (V _i) ou 2000 (V _n)	30 (S _s)
Melhores condições de marcação - resultados do GNU			
Potência da radiação (W)	Frequência de impulso (Hz)	Velocidade de marcação (mm/s)	Sobreposição de passagem (%)
17 (P _n)	30 000 (F _s)	1000 (V _i)	30 (S _s)

Tabela 32 - Melhores parâmetros de marcação *laser*, pela análise de variância

ANOVA
Parâmetros de marcação mais significativos - resultados do CC
Velocidade de marcação (mm/s)
Parâmetros de marcação mais significativos - resultados do CM, FPD
Frequência de impulso (Hz) e velocidade de marcação (mm/s)
Parâmetros de marcação mais significativos - resultados do GNU
Sobreposição de passagem (%)

Com base nos resultados de contraste obtidos determinou-se a percentagem média de contraste dos QRs em cada posição marcada na área polida (Figura 69). Estas posições encontram-se identificadas na Tabela 15, capítulo 4.3. Os resultados indicam que a presença de manchas na superfície reduz a qualidade dos códigos, nomeadamente através da redução do contraste. A posição 1 (QR1) e 3 (QR3) é mais vulnerável ao aparecimento de manchas, sendo o contraste dos códigos nestas posições em média, respetivamente, 68,4% e 66,6%. Já na posição 2 (QR2), o contraste obtido é superior, pois nesta área não existem manchas, obtendo-se em média um contraste de 76,9%. Na Tabela 33, efetuou-se uma comparação dos códigos marcados antes (com os parâmetros utilizados na produção) e depois (após a determinação do melhor conjunto de parâmetros recorrendo ao DoE), observe-se a diferença de aspeto do DMC e do QR.

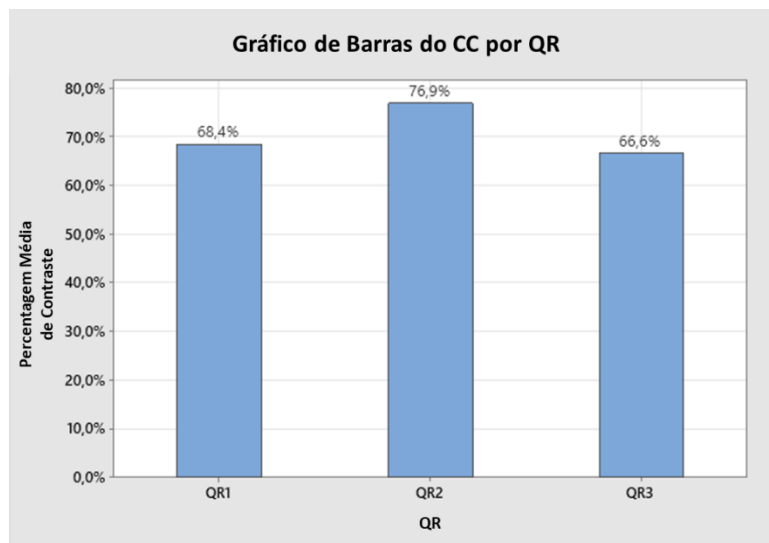


Figura 69 - Gráfico de barras do CC por QR

Tabela 33 - Comparação dos códigos marcados antes e depois de determinar o melhor conjunto de parâmetros, recorrendo ao DoE

Tipo de código	Antes	Depois
DMC		
QR		

4.8 Análise da superfície marcada nas amostras

Após a realização dos ensaios, analisou-se de forma detalhada no SEM a superfície marcada de várias amostras. Escolheram-se apenas DMCs como referência. Dado que a sobreposição de passagem não é um parâmetro que afeta significativamente a qualidade dos códigos marcados (premissa comprovada no capítulo 4.6), não se submeteram para análise todas as amostras, somente 30, que apresentam as seguintes características: i) amostras no nível nominal de sobreposição de passagem, mas com potência da radiação, frequência de impulso e velocidade de marcação no nível mínimo, nominal e máximo - total de 27 amostras; ii) a amostra com melhor e amostra com pior qualidade obtida através do verificador de códigos; e iii) uma amostra sem marcação *laser*. Começou-se por analisar a superfície do material de uma amostra sem marcação *laser*, Figura 70, a) e b), comparando-a com uma amostra com marcação *laser* c) e d).

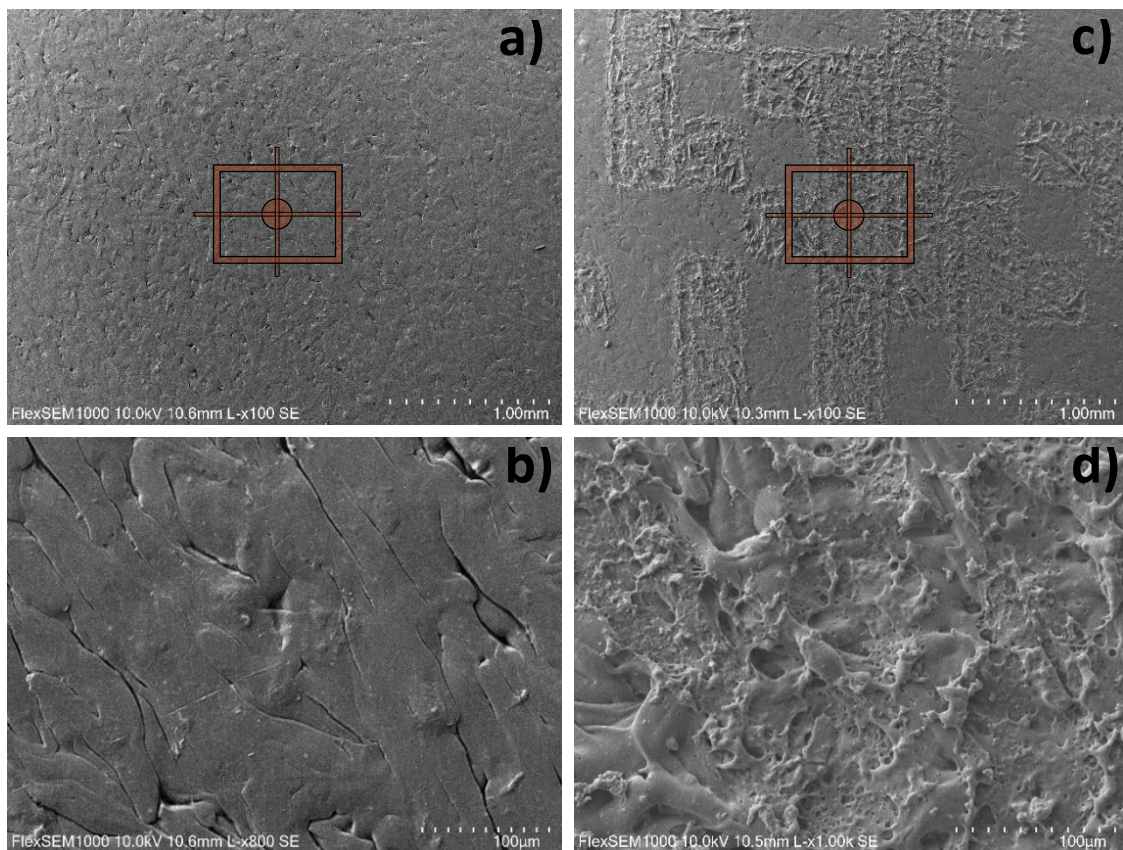


Figura 70 - Comparação entre uma amostra sem marcação *laser* a), b) e com marcação *laser* c), d)

Na Figura 70, é possível observar que a amostra sem marcação *laser* apresenta uma superfície mais homogênea do que a superfície da amostra marcada, que se apresenta irregular devido à passagem do feixe *laser*.

Efeito dos diferentes valores da potência da radiação (Amostras 6, 56, 11)

- Potência da Radiação Inferior à Recomendada pelo Fabricante (Pi)
- Potência da Radiação Igual à Recomendada pelo Fabricante (Pn)
- Potência da Radiação Superior à Recomendada pelo Fabricante (Ps)

Na Figura 71, a) e b), apresentam-se as imagens recolhidas com potência da radiação inferior à recomendada pelo fabricante (P_i), à escala de 1 mm e de 100 μm , respetivamente. A diferença entre a zona superficial marcada e não marcada não é muito evidente, pois a potência aplicada não é suficientemente elevada para gerar alterações significativas, resultando numa marcação esbatida. Para ampliações maiores, à escala de 100 μm é possível observar marcas do feixe *laser*.

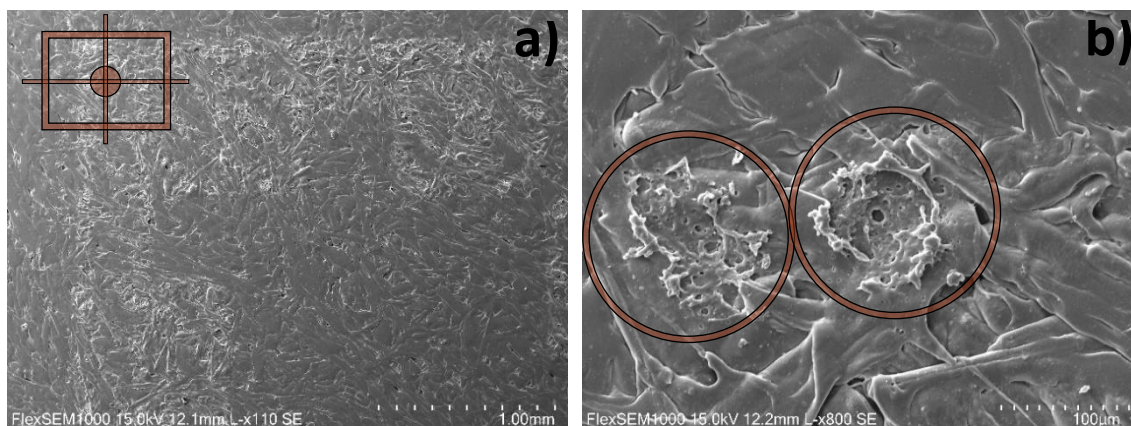


Figura 71 - Amostra marcada com P_i , F_n , V_n , S_n . a) à escala de 1 mm; b) à escala de 100 μm

Alterou-se a potência da radiação para o nível de potência igual à recomendada pelo fabricante (P_n). Na Figura 72, a) e b), apresentam-se as imagens para este nível de potência, à escala de 1 mm e de 100 μm , respetivamente. Neste caso, é mais clara a diferença entre a zona superficial marcada e não marcada, comparativamente ao nível de potência da radiação inferior à recomendada pelo fabricante (P_i), pois a potência aplicada é mais elevada, gerando alterações mais significativas. Para ampliações maiores, à escala de 100 μm é possível observar, também, marcas do feixe *laser*.

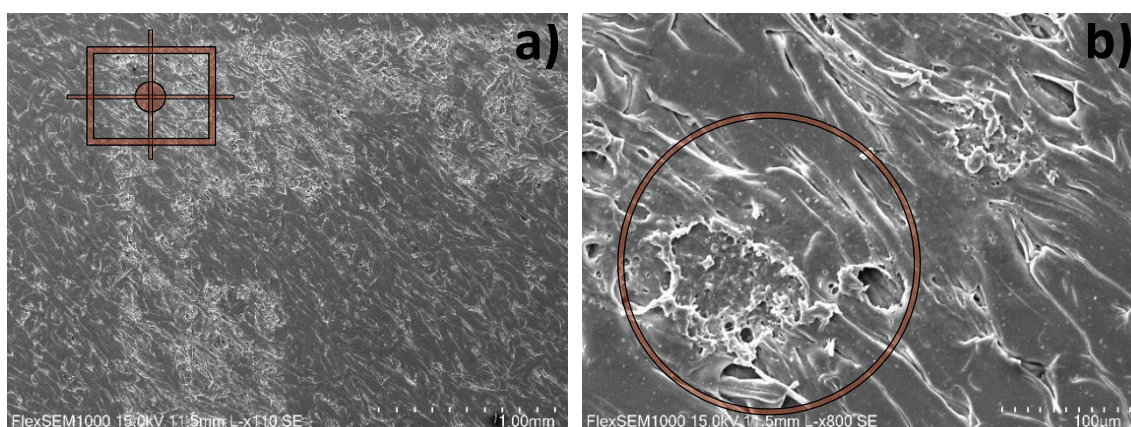


Figura 72 - Amostra marcada com P_n , F_n , V_n , S_n . a) à escala de 1 mm; b) à escala de 100 μm

Modificou-se a potência da radiação para o nível de potência superior à recomendada pelo fabricante (P_s). Na Figura 73, a) e b), apresentam-se as imagens para este nível de potência, à escala de 1 mm e de 100 μm , respetivamente, em que é possível observar a diferença entre a zona superficial marcada e não marcada. A potência aplicada é mais elevada do que a potência recomendada pelo fabricante (P_n), resultando numa

marcação mais evidente. Para ampliações maiores, à escala de 100 μm é possível observar uma superfície mais atacada pelo *laser*.

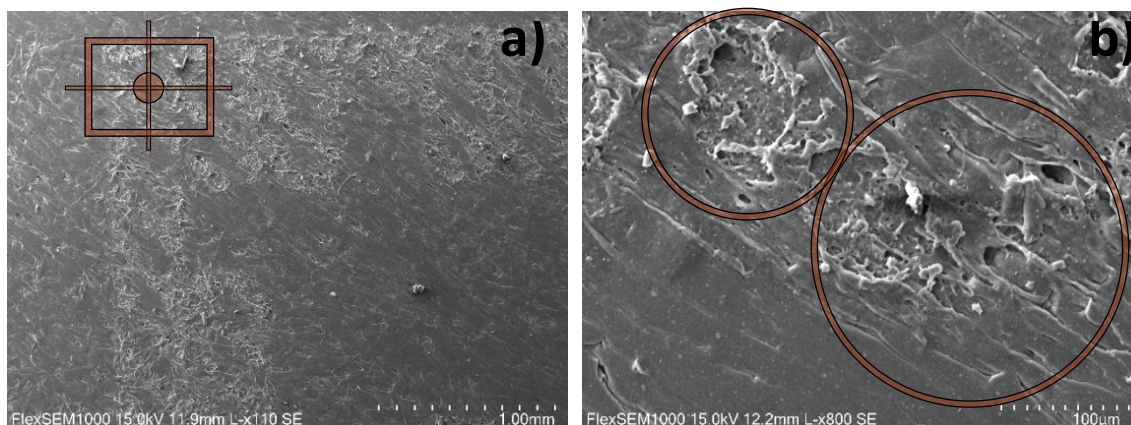


Figura 73 - Amostra marcada com Ps, Fn, Vn, Sn. a) à escala de 1 mm; b) à escala de 100 μm

Efeito dos diferentes valores da frequência de impulso (Amostras 75, 56, 13)

- Frequência de Impulso Inferior à Recomendada pelo Fabricante (F_i)
- Frequência de Impulso Igual à Recomendada pelo Fabricante (F_n)
- Frequência de Impulso Superior à Recomendada pelo Fabricante (F_s)

Na Figura 74, a) e b), apresentam-se as imagens recolhidas com frequência de impulso inferior à recomendada pelo fabricante (F_i), à escala de 1 mm e de 100 μm , respetivamente. A diferença entre a zona superficial marcada e não marcada não é muito evidente, pois a frequência de impulso aplicada não é suficientemente elevada para obter uma marcação contínua. Para ampliações maiores, à escala de 100 μm é possível observar a marca do feixe *laser* no seio de uma superfície homogénea.

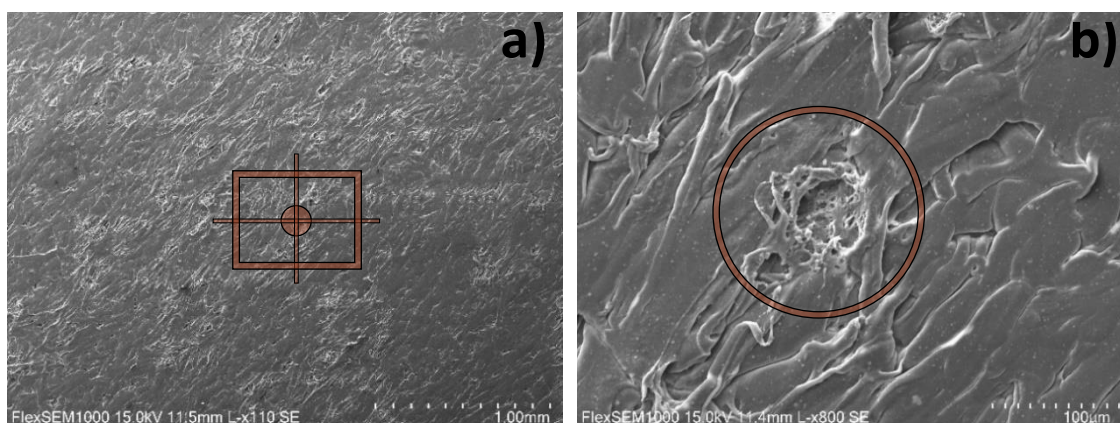


Figura 74 - Amostra marcada com Pn, Fi, Vn, Sn. a) à escala de 1 mm; b) à escala de 100 μm

Efetuuou-se a alteração da frequência de impulso para o nível de frequência igual à recomendada pelo fabricante (F_n). Na Figura 75 a) e b), apresentam-se as imagens para este nível de frequência à escala de 1 mm e de 100 μm , onde é mais evidente a diferença entre a zona superficial marcada e não marcada comparativamente ao nível de frequência de impulso inferior à recomendada pelo fabricante (F_i), pois a frequência de

impulso aplicada é mais elevada, permitindo obter uma marcação parcialmente mais contínua. Para ampliações maiores, à escala de 100 μm é possível observar marcas do feixe *laser*, que surgem de forma mais sequencial comparativamente ao cenário anterior.

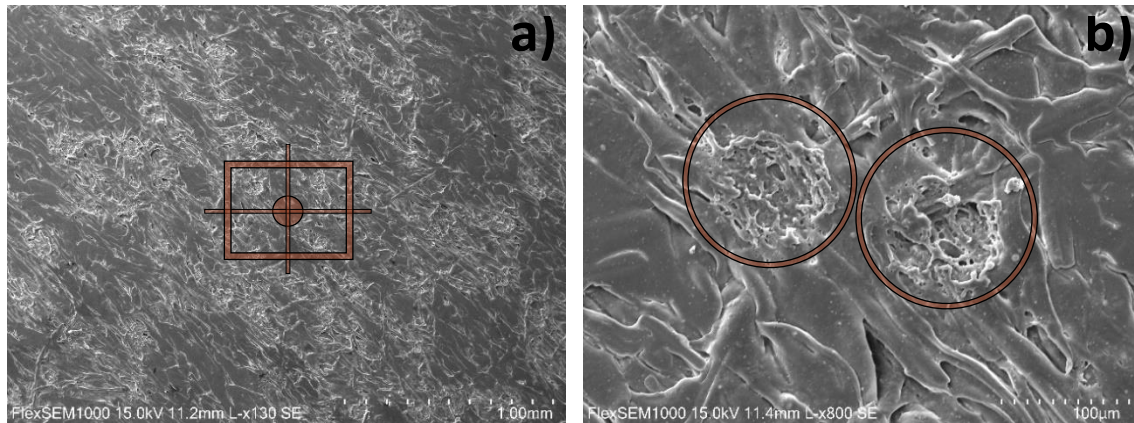


Figura 75 - Amostra marcada com Pn, Fn, Vn, Sn. a) à escala de 1 mm; b) à escala de 100 μm

Após alterar a frequência de impulso para o nível de frequência superior à recomendada pelo fabricante (F_s), tornou-se possível observar uma diferença mais acentuada entre a zona superficial marcada e não marcada, Figura 76 a) e b), à escala de 1 mm e de 100 μm , respetivamente. A frequência aplicada é mais elevada do que a frequência recomendada pelo fabricante (F_n), resultando numa marcação mais evidente e mais contínua comparativamente a esta. Para ampliações maiores, à escala de 100 μm é possível observar a marcação mais contínua do que no caso anterior, resultado de um feixe *laser* mais sequencial.

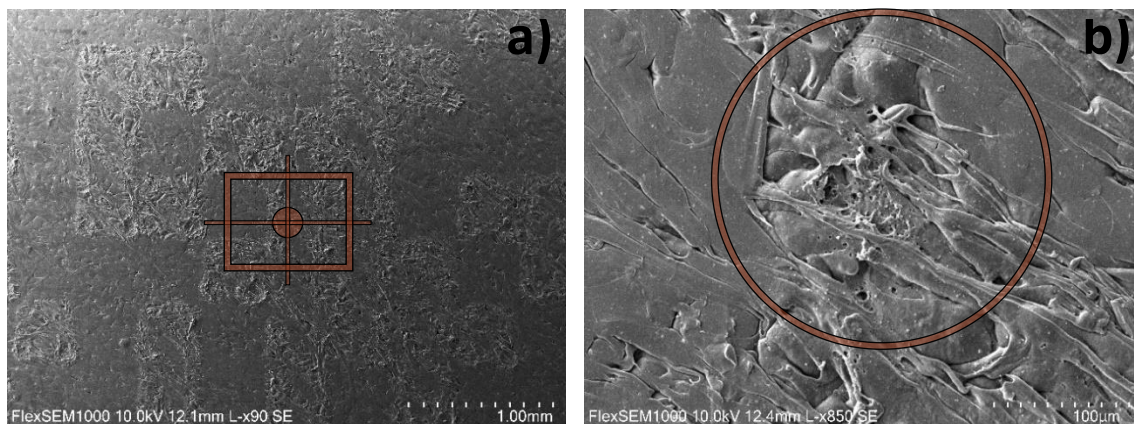


Figura 76 - Amostra marcada com Pn, Fs, Vn, Sn. a) à escala de 1 mm; b) à escala de 100 μm

Efeito dos diferentes valores da velocidade de marcação (Amostras 54, 56, 35)

- Velocidade de Marcação Inferior à Recomendada pelo Fabricante (V_i)
- Velocidade de Marcação Igual à Recomendada pelo Fabricante (V_n)
- Velocidade de Marcação Superior à Recomendada pelo Fabricante (V_s)

Na Figura 77 a) e b), apresentam-se as imagens recolhidas com velocidade de marcação inferior à recomendada pelo fabricante (V_i), à escala de 1 mm e de 100 μm , respetivamente. A diferença entre a zona superficial marcada e não marcada é bastante evidente, pois a velocidade selecionada é baixa, fazendo com que o tempo de interação do *laser* com a peça seja maior, gerando alterações superficiais significativas. Para ampliações maiores, à escala de 100 μm é possível observar uma marcação contínua da superfície.

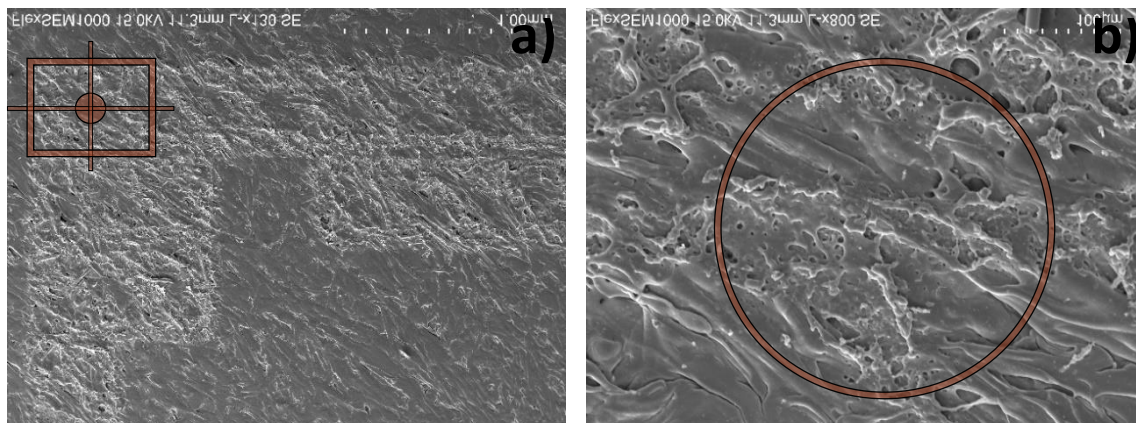


Figura 77 - Amostra marcada com Pn, Fn, V_i , Sn. a) à escala de 1 mm; b) à escala de 100 μm

Na Figura 78, a) e b), observa-se que após a alteração da velocidade de marcação para o nível de velocidade igual ao recomendado pelo fabricante (V_n), não é tão clara a diferença entre a zona superficial marcada e não marcada, comparativamente ao nível de velocidade de marcação inferior ao recomendado pelo fabricante (V_i), pois a velocidade selecionada é mais elevada, fazendo com que o tempo de interação do *laser* com a peça seja menor, gerando alterações superficiais menos significativas. Para ampliações maiores, à escala de 100 μm , é possível observar uma marcação descontínua da superfície.

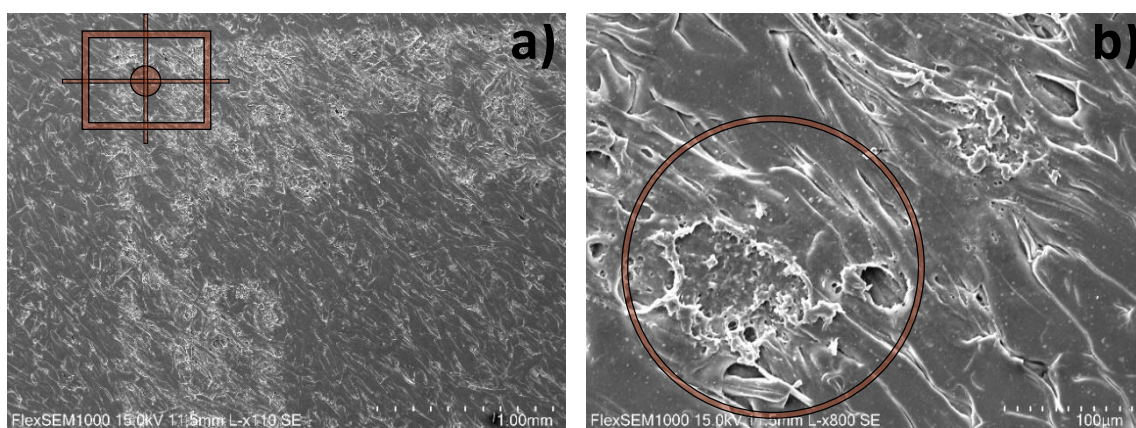


Figura 78 - Amostra marcada com Pn, Fn, V_n , Sn. a) à escala de 1 mm; b) à escala de 100 μm

Modificou-se a velocidade de marcação para o nível superior ao recomendado pelo fabricante (V_s). Na Figura 79, apresentam-se as imagens para este nível de velocidade, onde não é possível observar com clareza a diferença entre a zona superficial marcada

e não marcada. A velocidade de marcação é mais elevada do que a recomendada pelo fabricante (V_n), resultando num aspeto superficial com alterações pouco significativas e uma marcação esbatida. Para ampliações maiores, à escala de $100\ \mu\text{m}$ é possível observar que o material apresenta uma superfície pouco atacada pelo *laser*.

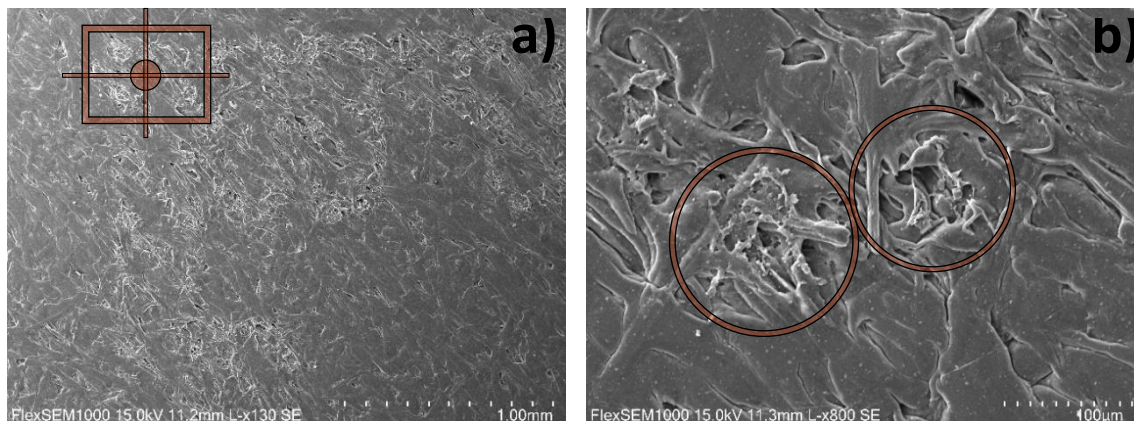


Figura 79 - Amostra marcada com Pn, Fn, Vs, Sn. a) à escala de 1 mm; b) à escala de $100\ \mu\text{m}$

Na Figura 80, encontra-se a superfície da amostra 63, que contém o código que apresenta a melhor qualidade de todos. Nesta amostra, é possível observar de forma evidente a diferença entre a zona superficial marcada e não marcada. A superfície resultante da combinação de parâmetros revela-se mais atacada pelo *laser* e com marcação contínua, cujo efeito é possível de ser observado para ampliações maiores, à escala de $100\ \mu\text{m}$, Figura 80, b).

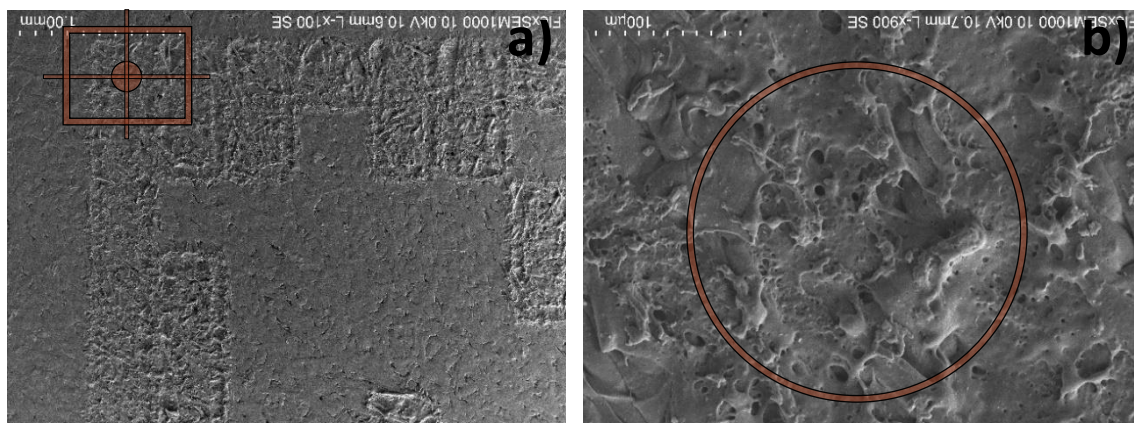


Figura 80 - Amostra marcada com Ps, Fs, Vi, Ss. a) à escala de 1 mm; b) à escala de $100\ \mu\text{m}$

Por oposição, na Figura 81, é possível observar a superfície da amostra 37, que contém o código que possui a pior qualidade de todos. Nesta amostra, não é possível observar com clareza a diferença entre a zona superficial marcada e não marcada. A combinação de parâmetros resulta num aspeto superficial com alterações pouco significativas e uma marcação esbatida. Na Figura 81 b), para ampliações maiores à escala de $100\ \mu\text{m}$, é possível observar que o material apresenta uma superfície quase homogénea.

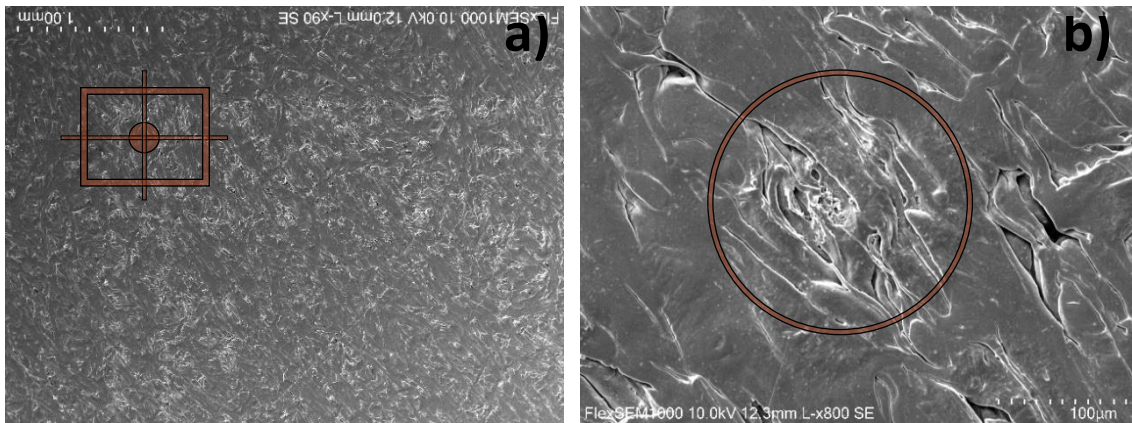


Figura 81 - Amostra marcada com Ps, Fs, Vi, Ss. a) à escala de 1 mm; b) à escala de 100 μm

Recorrendo a um sistema EDS próprio para o modelo FlexSEM 1000, analisou-se quimicamente a amostra 63 numa área sem marcação *laser* (Figura 82), e com marcação *laser* (Figura 83). A análise EDS revelou que não existe diferença na composição química entre estas duas áreas, o que indica que os parâmetros *laser* utilizados não provocam alterações químicas na superfície. Note-se que os resultados obtidos são semi-quantitativos e que o equipamento não consegue detetar o elemento químico hidrogénio (H), que tem grande impacto nas percentagens obtidas. A concentração mássica normalizada de cada elemento químico presente na superfície da amostra 63 encontra-se na Tabela 34.

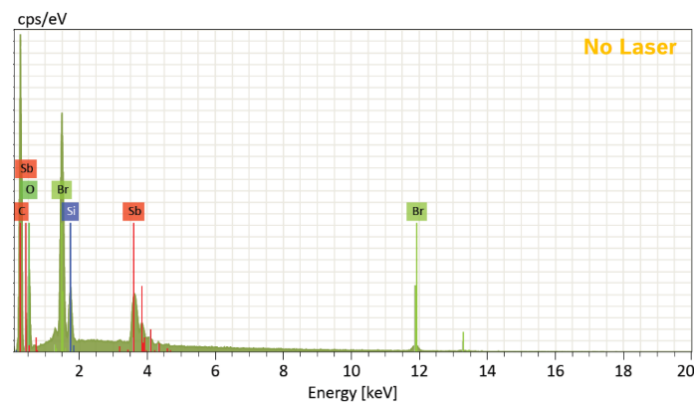


Figura 82 - Análise química da amostra 63 numa área sem marcação *laser*

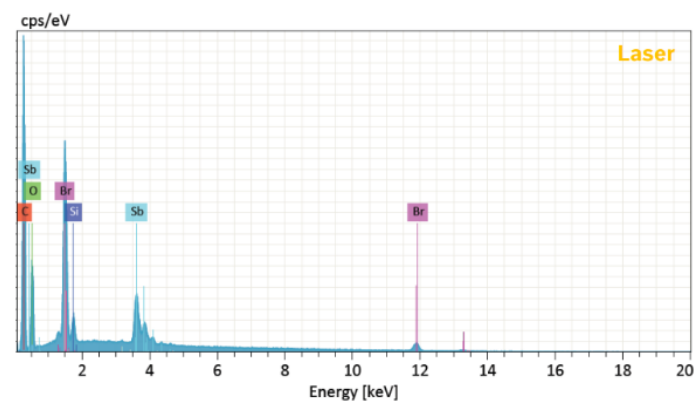


Figura 83 - Análise química da amostra 63 numa área com marcação *laser*

Tabela 34 - Concentração mássica normalizada de cada elemento químico presente na amostra 63

Área da Amostra	Concentração mássica normalizada [%]				
	C	O	Si	Br	Sb
Área sem marcação <i>laser</i>	59,53	21,08	1,59	10,68	7,12
Área com marcação <i>laser</i>	59,32	21,15	0,89	11,38	7,26

Das análises efetuadas à superfície das amostras deste material, concluiu-se que:

- A potência da radiação inferior à recomendada pelo fabricante (P_i), não é suficiente para conferir alterações evidentes entre a zona superficial marcada e não marcada, resultando numa marcação esbatida;
- À medida que se aumenta a potência da radiação para níveis iguais ou superiores aos recomendados pelo fabricante, mantendo a frequência de impulso, velocidade de marcação e sobreposição de passagem em níveis recomendados pelo mesmo, a marcação torna-se mais visível;
- A frequência de impulso inferior à recomendada pelo fabricante (F_i), não é suficiente para conferir alterações evidentes entre a zona superficial marcada e não marcada, resultando em marcação intermitente e, portanto, descontínua;
- À medida que se aumenta a frequência de impulso para níveis iguais ou superiores aos recomendados pelo fabricante, mantendo a potência da radiação, velocidade de marcação e sobreposição de passagem em níveis recomendados pelo mesmo, a superfície revela-se mais atacada e a marcação torna-se mais visível e contínua, por efeito de um feixe *laser* mais sequencial e, portanto, de uma maior interação do *laser* com a peça;
- A velocidade de marcação superior à recomendada pelo fabricante (V_i), não é suficiente para conferir alterações evidentes entre a zona superficial marcada e não marcada, resultando numa marcação esbatida;
- À medida que se reduz a velocidade de marcação para níveis iguais ou inferiores aos recomendados pelo fabricante, mantendo a potência da radiação, frequência de impulso e sobreposição de passagem em níveis recomendados pelo mesmo, a marcação torna-se mais visível e contínua. Isto acontece, pois, quanto menor é a velocidade, maior é a interação do *laser* com a peça, gerando alterações superficiais significativas;
- Os parâmetros *laser* utilizados não provocam alterações químicas na superfície.

4.9 Correspondência das análises estatísticas com as análises laboratoriais

Durante esta dissertação, foram realizadas as seguintes análises:

- Análise ótica dos códigos marcados com o verificador;
- Análise da superfície marcada;
- Análise estatística dos resultados obtidos com o verificador.

Na Tabela 35, encontram-se as principais conclusões das análises efetuadas aos códigos.

Tabela 35 - Correspondência das análises em relação à qualidade dos códigos obtidos

Tipo de análise	Comentários
Análise ótica com o verificador	<p>Quanto menor a potência da radiação e frequência de impulso e maior a velocidade de marcação, mais esbatida é a marcação resultante e, portanto, pior a qualidade do código. Relativamente à sobreposição de passagem, a mesma não tem impacto significativo na classificação global atribuída à qualidade do código, pois existem códigos com baixa sobreposição de passagem e boa classificação, no entanto, este parâmetro de marcação combinado com outros permite preencher mais o código, melhorando o seu aspeto e robustez.</p>
Análise estatística com o software Minitab®	<p>A frequência de impulso e a velocidade de marcação têm maior importância, relativamente aos restantes parâmetros de marcação <i>laser</i>, em todas as características dos DMCs e QRs. Os resultados do QR indicam que a presença de manchas na superfície reduz a qualidade dos códigos, nomeadamente através da redução do contraste. A posição 1 (QR1) e 3 (QR3) é mais vulnerável ao aparecimento de manchas, sendo o contraste dos códigos nestas posições em média, respetivamente, 68,4% e 66,6%. Já na posição 2 (QR2), o contraste obtido é superior, pois nesta área não existem manchas permitindo obter em média um contraste de 76,9%. Por esta razão, para a análise estatística do QR utilizou-se como referência a posição 2 (QR2), pois os resultados são mais fidedignos.</p> <p>As melhores condições de marcação para obter o melhor nível de qualidade são:</p>

- **DMC:** Potência da radiação superior à recomendada pelo fabricante (P_s); frequência de impulso superior à recomendada pelo fabricante (F_s); velocidade de marcação inferior à recomendada pelo fabricante (V_i); sobreposição de passagem superior à recomendada pelo fabricante (S_s);
- **QR:** Potência da radiação igual à recomendada pelo fabricante (P_n); frequência de impulso igual à recomendada pelo fabricante (F_n); velocidade de marcação igual à recomendada pelo fabricante (V_n); sobreposição de passagem superior à recomendada pelo fabricante (S_s);

**Análise da superfície
marcada com o SEM**

Confirmou-se, com o auxílio do SEM, que as amostras com potência da radiação e frequência de impulso mais baixas e velocidade de marcação mais elevadas, apresentam uma marcação mais esbatida.

Concluiu-se, relativamente à qualidade dos DMCs, que os parâmetros de marcação *laser* ideais não se situam perto dos valores recomendados pelo fabricante. Através da análise estatística, foi possível determinar o conjunto de parâmetros para obter o melhor resultado em cada característica do código. No caso do DMC, verificou-se a existência de um conjunto de parâmetros que permite obter os melhores resultados em quase todas as características, exceto o GNU.

Contrariamente, no caso dos QRs, apenas deve ser alterada a sobreposição de passagem para valores superiores aos recomendados pelo fabricante de forma a se obterem os parâmetros ideais. Tal como para os DMCs, através da análise estatística foi possível determinar o conjunto de parâmetros para obter o melhor resultado em cada característica dos QRs. No caso do QR, dada a complexidade deste tipo de códigos inerente à quantidade de módulos e informação contida, não se tornou possível determinar nenhum conjunto de parâmetros que permitisse obter os melhores resultados em quase todas as características. No entanto, utilizou-se como referência os parâmetros que permitem maximizar os resultados de qualidade no global, obtendo-se desta forma um compromisso. Existe ainda a possibilidade de trabalhar os parâmetros para melhorar determinadas características que se mostrem necessárias no QR.

4.10 Comparação dos resultados obtidos com estudos semelhantes

No presente capítulo, efetuou-se uma comparação entre os resultados obtidos nesta dissertação e os obtidos num estudo semelhante, descrito no capítulo 2.2.3. O estudo cuja metodologia mais se aproxima do trabalho realizado nesta dissertação corresponde ao associado ao artigo “*Laser direct-part marking of data matrix symbols on carbon steel substrates*”. Apesar deste estudo ter sido realizado em substratos de aço ao carbono, o âmbito é semelhante ao desta dissertação, pois os autores analisaram a influência dos parâmetros de marcação *laser* na qualidade dos DMCs obtidos através de um DoE fatorial, utilizaram também um verificador para analisar a qualidade dos códigos marcados e o SEM para analisar a superfície marcada.

Ainda que os materiais de estudo sejam diferentes, existem semelhanças nos resultados obtidos no que diz respeito à influência dos parâmetros de marcação *laser* na qualidade dos códigos. Por exemplo, relativamente à frequência de impulso provou-se, tal como os autores do artigo mencionado, que a mesma tem influência na maioria das características do DMC. De igual forma, mostrou-se que a sobreposição de passagem por si só não tem impacto significativo na classificação global atribuída à qualidade do código, no entanto, este parâmetro de marcação combinado com outros permite preencher mais o código melhorando o seu aspeto e robustez. No entanto, no que diz respeito à potência da radiação e velocidade de marcação os resultados são ligeiramente distintos. Os autores consideram que a potência da radiação tem impacto na maioria das características do DMC, enquanto nesta dissertação se provou que para o material utilizado no estudo a potência da radiação não tem impacto significativo nas várias características. Relativamente à velocidade de marcação os autores referem que a mesma apenas tem impacto significativo nas várias características dos códigos por interação com outros parâmetros, mas nesta dissertação provou-se que a velocidade de marcação assim como a frequência de impulso, por si só, têm efeito significativo nas mesmas.

CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

5.2 Proposta de trabalhos futuros

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, apresentam-se as conclusões e contribuições do estudo, assim como algumas limitações que surgiram durante o projeto e sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

Através da realização deste projeto de dissertação, foi possível analisar, estudar e testar a influência de diferentes parâmetros de marcação *laser* na qualidade da marcação, tendo como fruto a melhoria da qualidade de um processo específico da área de montagem final da Bosch Car Multimédia Portugal S.A., o processo de marcação *laser*.

Verificou-se no histórico de avarias que os técnicos de manutenção, por vezes, alteram os valores dos diferentes parâmetros de marcação *laser* recomendados pelo fabricante do equipamento de fonte *laser* nas suas intervenções. Estas alterações são efetuadas, porque no decorrer da produção surgem falhas no posto de inspeção ótico automático (*Automatic Optical Inspection - AOI*), pois nem sempre os valores recomendados pelo fabricante são os que conferem melhor qualidade, fiabilidade e robustez à marcação. No entanto, estas modificações de parâmetros sempre foram realizadas de forma empírica, sem qualquer estudo que suportasse o sentido dessas alterações.

O principal objetivo deste projeto consistiu em realizar um estudo sistemático que permitisse obter o melhor conjunto de condições de marcação *laser*, através de um DoE fatorial, proporcionando assim obter a melhor qualidade ao conteúdo marcado de forma fundamentada, de modo a evitar reclamações e desperdícios por paragens de produção para se efetuarem tentativas de redução da rejeição e produto sucitado, com alterações sistemáticas de parâmetros.

Visto que as organizações possuem processos e produtos cada vez mais complexos, torna-se imperativo empregar metodologias e ferramentas, tal como o DoE, para efetuar experiências de forma estruturada, analisar dados de forma concisa e tomar decisões de forma acertada. Após uma análise detalhada da literatura, foi possível identificar que, apesar do uso do DoE ser bastante comum na indústria em geral, mesmo na indústria automóvel, não foram encontrados registos de aplicação desta metodologia no material escolhido para o estudo.

Decidiu-se então, realizar os ensaios num equipamento de fonte *laser* de fibra ótica que se encontra instalado numa linha de montagem final de painéis de instrumentos para motociclos (*Two wheelers - 2W02*), tendo-se selecionado diferentes tipos de parâmetros e níveis para o estudo. Selecionou-se o material Ultradur® B 4406 G6, PBT-GF30 FR(17) (*Flame Retardant*), que é utilizado no fabrico de painéis de instrumentos para cinco

clientes distintos. Trata-se de um material complexo para efetuar marcação com bom contraste devido à presença de fibra de vidro, encontrando-se associados problemas de qualidade na marcação.

A potência da radiação, frequência de impulso, velocidade de marcação e sobreposição de passagem, correspondem aos parâmetros selecionados em consenso pela equipa do projeto, encontrando-se, por sua vez, alinhados com estudos semelhantes efetuados por outros autores.

Analisaram-se oticamente todos os códigos marcados através de um verificador e obteve-se com rigor a classificação das várias características dos códigos de A (4.0) a F (0.0) segundo a norma ISO/IEC 29158:2020. Confirmou-se que, quanto menor a potência da radiação e frequência de impulso e maior a velocidade de marcação, mais esbatida é a marcação resultante e, portanto, pior a qualidade do código. A sobreposição de passagem não tem impacto significativo na classificação global atribuída à qualidade do código, pois existem códigos com baixa sobreposição de passagem e boa classificação. No entanto, este parâmetro de marcação permite preencher mais o código, melhorando o seu aspeto e robustez. Após a análise de todos os códigos, exportaram-se os resultados obtidos para Excel®, tendo-se tratado e correlacionado os mesmos no *software* Minitab®.

Através da análise estatística, verificou-se que a frequência de impulso e a velocidade de marcação têm maior importância, relativamente aos restantes parâmetros de marcação *laser*, em todas as características, tanto dos DMCs, como dos QRs.

Os parâmetros mais significativos para o CC dos DMCs são a frequência de impulso, velocidade de marcação e sobreposição de passagem, enquanto nos QRs é apenas a velocidade de marcação. No que se refere ao CM e ao FPD, tanto nos DMCs como nos QRs, os parâmetros mais significativos são a frequência de impulso e a velocidade de marcação. Relativamente ao GNU, a frequência de impulso e a velocidade de marcação são os parâmetros mais significativos nos DMCs e a sobreposição de passagem nos QRs.

De acordo com o DoE, os parâmetros de marcação *laser* que permitem obter o melhor nível de qualidade nas várias características do DMC correspondem aos utilizados na experiência número 63 ($P = 19 \text{ W}$, $f = 30 \text{ kHz}$, $v = 1000 \text{ mm/s}$, $s = 30\%$), enquanto no QR correspondem aos utilizados na experiência número 39 ($P = 17 \text{ W}$, $f = 25 \text{ kHz}$, $v = 2000 \text{ mm/s}$, $s = 30\%$).

Os resultados indicam que a presença de manchas na superfície reduz a qualidade dos códigos, nomeadamente através da redução do contraste. A posição 1 (QR1) e 3 (QR3) é mais vulnerável ao aparecimento de manchas, sendo o contraste dos códigos nestas posições em média, respetivamente, 68,4% e 66,6%. Já na posição 2 (QR2), o contraste obtido é superior, pois nesta área não existem manchas permitindo obter em média um contraste de 76,9%. Desta forma, como os códigos são elementos importantes para o registo de dados de rastreabilidade e as manchas são inerentes à injeção e surgem

normalmente nos mesmos locais, não sendo possível a remoção das mesmas pelo fornecedor, a posição mais indicada para marcar o DMC é a posição 2, já o QR terá uma zona polida específica para o efeito, onde poderá ser marcado sem problemas.

Com o auxílio do SEM, foi possível analisar detalhadamente a superfície marcada de várias amostras, observando-se o efeito dos parâmetros nas alterações superficiais. Concluiu-se que, tal como na análise ótica com o verificador, valores de potência da radiação e frequência de impulso mais baixos e velocidade de marcação mais elevados, resultam numa marcação pouco visível. Demonstrou-se que, frequências de impulso maiores e velocidade de marcação menores, resultam numa superfície mais atacada pelo *laser* e uma marcação mais contínua, pois maior é a interação do *laser* com a peça, gerando alterações superficiais significativas.

Com estes diferentes estudos realizados, fornece-se valor acrescentado à empresa de acolhimento, destacando-se os seguintes contributos:

- Realização de vários ensaios em diferentes condições de marcação, obtendo-se o conhecimento da influência dos parâmetros de marcação nas várias características dos códigos;
- Determinação dos melhores valores para os diferentes parâmetros de marcação *laser* e formas de melhorar características específicas dos dois tipos de código, contribuindo para a redução de reclamações, desperdícios por produto sucitado, paragens de produção devido à rejeição e aumento dos níveis de qualidade de pelo menos cinco clientes distintos, nos quais se utiliza o material em estudo para efetuar marcação *laser*;
- Desenvolvimento de conhecimento interno sobre o processo, nomeadamente através do estudo detalhado da influência dos parâmetros de marcação nas alterações superficiais recorrendo ao SEM;
- Incentivo à melhoria contínua através da utilização da metodologia DoE em projetos futuros.

Em suma, um conjunto de boas práticas devem ser adotadas, por diferentes partes, de forma a garantir um bom desempenho do processo de marcação *laser*:

- O desenvolvimento de produto deve ter em consideração se o material escolhido para uma determinada aplicação onde está previsto efetuar a marcação *laser* de certificações e dados de rastreabilidade, é facilmente marcado. No caso do material em estudo, foi dada prioridade a características mecânicas e ignífugas, no entanto, a facilidade de marcação deve ser considerada de forma a favorecer o processo;
- A engenharia de processo deve prestar mais atenção aos parâmetros de marcação disponibilizados pelo fabricante pois, tal como se viu, nem sempre os parâmetros recomendados pelo fabricante são os mais aconselhados. Sempre que possível, deve requisitar amostras de material ao desenvolvimento de

produto para efetuar testes de marcação e avaliar em fases prematuras do projeto a compatibilidade do *laser* e facilidade de marcação nos materiais;

- Os técnicos de manutenção devem realizar no tempo certo as manutenções preventivas, nomeadamente a limpeza das máquinas, turbinas de extração e lentes de foco.

5.2 Proposta de trabalhos futuros

Nesta dissertação aplicou-se um DoE fatorial, com quatro parâmetros de marcação *laser*, cada um com três níveis distintos, num equipamento *laser* de fibra ótica e um material que se considerou prioritário para estudo devido aos problemas de qualidade existentes. Propostas de trabalho futuro passariam por:

- Aplicar a metodologia DoE noutros equipamentos *laser* e materiais plásticos e metálicos distintos, de forma a concluir se os resultados obtidos são idênticos;
- Realizar ensaios com outros parâmetros de marcação *laser*;
- Realizar ensaios com outro tipo de marcações, como por exemplo: texto, certificações, logotipos.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

6 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] J. A. Garcia, M. Pardo, e T. Bonavía, «Longitudinal study of the results of continuous improvement in an industrial company», *Team Perform. Manag. An Int. J.*, vol. 14, n. 1–2, pp. 56–69, 2008.
- [2] A. Lorenzo e J. Prado, «Employee participation systems in Spain. Past, present and future», *Total Qual. Manag. Bus. Excell.*, vol. 14, n. 1, pp. 15–24, 2003.
- [3] A. W. Grütter, J. M. Field, e N. H. B. Faull, «Work team performance over time: Three case studies of South African manufacturers», *J. Oper. Manag.*, vol. 20, n. 5, pp. 641–657, 2002.
- [4] Bosch, *Manual BPS*. Publicação Interna, 2021.
- [5] M. Barad, «Design of Experiments (DoE)—A Valuable Multi-Purpose Methodology», *Appl. Math.*, vol. 5, n. 14, pp. 2120–2129, 2014.
- [6] C. Li, C. Lu, e J. Li, «Research on the quality of laser marked Data Matrix symbols», *Key Eng. Mater.*, vol. 764, n. 1, pp. 219–224, 2018.
- [7] J. Li *et al.*, «Experimental investigation and mathematical modeling of laser marking two-dimensional barcodes on surfaces of aluminum alloy», *J. Manuf. Process.*, vol. 21, n. 1, pp. 141–152, 2016.
- [8] C. Velotti, A. Astarita, C. Leone, S. Genna, F. M. C. Minutolo, e A. Squillace, «Laser Marking of Titanium Coating for Aerospace Applications», *Procedia CIRP*, vol. 41, n. 1, pp. 975–980, 2016.
- [9] W. Jangsombatsiri e J. D. Porter, «Laser direct-part marking of data matrix symbols on carbon steel substrates», *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 129, n. 3, pp. 583–591, 2007.
- [10] C. Wimmer, S. Moser, T. Neel, e L. Zhen, «Readability of directly-marked traceability symbols on PCBs», em *Omron Microscan Industrial Automation Solutions*, vol. 129, n. 1–3, pp. 3–10, 2016.
- [11] Bosch, *Projeto EMS*. Publicação Interna, 2021.
- [12] Bosch, *Manual de Acolhimento e Integração*. Publicação Interna, 2021.
- [13] J. Hecht, «A short history of laser development», *Opt. Eng.*, vol. 49, n. 49, pp. 99–122, 2010.
- [14] A. R. Ribeiro, L. Coelho, O. Bertolami, e R. André, «Luz: História, Natureza e Aplicações», *Gaz. física*, vol. 39, n. 1–2, pp. 1–8, 2015.
- [15] Y. Kang, B. Rabie, e R. Wong, «A review of laser applications in orthodontics», *Int. J. Orthod.*, vol. 25, n. 1, pp. 47–56, 2014.
- [16] C. Silva e O. Freire, «Um Presente de Apolo: lasers, história e aplicações», *Rev. Bras. Ensino Física*, vol. 39, n. 1, pp. 1–10, 2016.

- [17] M. Bertolotti, *Masers and Lasers: An Historical Approach (2nd edition)*. New York, USA: CRC Press, 2015. ISBN: 978-1482217773
- [18] B. Saleh, «The laser», em *Optics in Our Time*, Cham, Switzerland: Springer Nature, pp. 71–85, 2016. ISBN: 978-3319319025
- [19] W. Steen e J. Mazumder, *Laser Material Processing (4th edition)*. New York, USA: Springer Science & Business Media, 2010. ISBN: 978-1849960618
- [20] A. Javan e R. J. Scully, «Ali Javan - A Biographical Memoir», *National Academy of Sciences*, 2019. [Online]. Disponível em: <http://www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/javan-ali.pdf>. [Acedido: 15-Abr-2022].
- [21] A. Grimes, «The Evolution and History of Laser Marking and Engraving», *TYKMA-Electrox*, 2019. [Online]. Disponível em: <https://www.permanentmarking.com/history-of-laser-marking/>. [Acedido: 02-Nov-2021].
- [22] ADS Laser, «How does Laser Cutting work?», *Laser Cutting*, 2021. [Online]. Disponível em: <https://adslaser.co.uk/how-does-laser-cutting-work/>. [Acedido: 15-Abr-2022].
- [23] M. F. Chen, W. T. Hsiao, W. L. Huang, C. W. Hu, e Y. P. Chen, «Laser coding on the eggshell using pulsed-laser marking system», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, n. 2, pp. 737–744, 2009.
- [24] J. Diaci, D. Braun, A. Gorki, e J. Moina, «Rapid and flexible laser marking and engraving of tilted and curved surfaces», *Opt. Lasers Eng.*, vol. 49, n. 2, pp. 195–199, 2011.
- [25] D. A. Belforte, «Annual Economic Review and Forecast», *Ind. Laser Solut.*, vol. 28, n. 1, pp. 6–16, 2012.
- [26] Optech Consulting, «Industrial Laser and Systems Market 2021», *Laser Market Data*, 2022. [Online]. Disponível em: <https://optech-consulting.com/laser-market-data/#lasersandsystems2021>. [Acedido: 15-Abr-2022].
- [27] J. Landry, «Fiber Lasers: Everything you need to know», *Laserax*, 2020. [Online]. Disponível em: <https://www.laserax.com/blog/fiber-laser>. [Acedido: 20-Mai-2022].
- [28] A. Bernatskyi e V. Khaskin, «The history of the creation of lasers and analysis of the impact of their application in the material processing on the development of certain industries», *Hist. Sci. Technol.*, vol. 11, n. 1, pp. 125–149, 2021.
- [29] A. Lamikiz, E. Ukar, I. Tabernerero, e S. Martinez, «Thermal advanced machining processes», em *Modern Machining Technology: A Practical Guide*, Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, pp. 335–372, 2011. ISBN: 978-0857090997
- [30] V. Bagnato, «Os Fundamentos da Luz Laser», *Física na Esc.*, vol. 2, n. 1, pp. 4–9, 2001.

- [31] M. Bertolotti, *The History of the Laser (1st edition)*. London, England: CRC Press, 2004. ISBN: 978-0750309110
- [32] C. Townes, «Introduction to Laser Technology», em *Basic Laser Principles*, vol. 2, n. 1, California, USA: Melles Griot, pp. 1–31, 2009.
- [33] S. C. Singh, H. Zeng, C. Guo, e W. Cai, «Lasers: Fundamentals, Types, and Operations», em *Nanomaterials: Processing and Characterization with Lasers*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH, pp. 1–34, 2012. ISBN: 978-3527327157
- [34] M. Schmidt, M. Zäh, L. Li, J. Duflou, L. Overmeyer, e F. Vollertsen, «Advances in macro-scale laser processing», *CIRP Ann.*, vol. 67, n. 2, pp. 719–742, 2018.
- [35] J. Ion, «Evolution of Laser Material Processing», em *Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application*, Oxford, England: Elsevier Butterworth-Heinemann, pp. 12–40, 2005. ISBN: 978-0750660792
- [36] Omron, «Laser Marker Technical Guide», 2020. [Online]. Disponível em: https://assets.omron.eu/downloads/datasheet/en/v1/q252_laser_marker_technical_guide_datasheet_en.pdf. [Acedido: 16-Mai-2022].
- [37] SPT Laser, «CO2 Laser Tube Structure and Working Principle», *Structure of CO2 Laser*, 2019. [Online]. Disponível em: <https://www.sptlaser.net/solution/27>. [Acedido: 23-Nov-2021].
- [38] I. Amaral, F. J. G. Silva, G. F. L. Pinto, R. D. S. G. Campilho, e R. M. Gouveia, «Improving the cut surface quality by optimizing parameters in the fibre laser cutting process», *Procedia Manuf.*, vol. 38, n. 1, pp. 1111–1120, 2019.
- [39] T. Omi e K. Numano, «The role of the CO2 laser and fractional CO2 laser in dermatology», *Laser Therapy*, vol. 23, n. 1, pp. 49–60, 2014.
- [40] Y. Xu, Y. Li, T. Feng, e Y. Qiu, «Principle of phase-locking of axisymmetric concentric cavity CO2 laser», *Optik (Stuttg.)*, vol. 121, n. 15, pp. 1363–1369, 2010.
- [41] Y. Zhang e T. Killeen, «CO2 Lasers: Progressing from a varied past to an application-specific future», *Laser Focus World*, vol. 52, n. 11, pp. 29–32, 2016.
- [42] M. G. Catorze, «Laser: Fundamentos e indicações em dermatologia», *Med. Cutan. Ibero. Lat. Am.*, vol. 37, n. 1, pp. 5–27, 2009.
- [43] A. Gomersall, *Lasers in materials processing: A bibliography of a developing technology*. Heidelberg, Berlim: Springer Science & Business Media, 2013. ISBN: 978-3662301968
- [44] B. Weston, «Technology considerations for laser welding tubes and pipes», *The fabricator*, 2014. [Online]. Disponível em: <https://www.thefabricator.com/article/laserwelding/technologyconsiderations-for-laser-welding-tubes-and-pipes>. [Acedido: 18-Nov-2021].
- [45] H. Injeyan e G. Goodno, *High Power Laser Handbook*. New York, USA: McGraw-Hill, 2011. ISBN: 978-0071609012

- [46] J. Pozo, «The Worldwide Market for Lasers», *Laser Tech. J.*, vol. 15, n. 3, pp. 24–25, 2018.
- [47] D. J. Richardson, J. Nilsson, e W. A. Clarkson, «High power fiber lasers: current status and future perspectives», *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 27, n. 11, pp. 63–92, 2010.
- [48] M. Melo, J. M. Sousa, M. O. Berendt, S. T. Hendow, e J. R. Salcedo, «Lasers de Fibra Óptica de Alta Potência: conceito, limitações e aplicações», *Gaz. física*, vol. 34, n. 1, pp. 22–28, 2015.
- [49] A. Othonos, «Fiber Bragg gratings», *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 68, n. 12, pp. 4309–4341, 1997.
- [50] W. Shi, Q. Fang, X. Zhu, R. A. Norwood, e N. Peyghambarian, «Fiber lasers and their applications», *Appl. Opt.*, vol. 53, n. 28, pp. 6554–6568, 2014.
- [51] M. N. Zervas e C. A. Codemard, «High power fiber lasers: A review», *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 20, n. 5, pp. 1–23, 2014.
- [52] M. H. Reddy, «Optical Fibers - Principles and Applications», *Basic Appl. Eng. Res.*, vol. 1, n. 6, pp. 86–89, 2014.
- [53] E. Gregersen, «Fiber optics», *Encyclopedia Britannica*, 2019. [Online]. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/fiber-optics>. [Acedido: 10-Dez-2021].
- [54] I. Tools, «Laser Diode Working Principle», *Laser Diode*, 2019. [Online]. Disponível em: <https://instrumentationtools.com/laser-diode-working-principle/>. [Acedido: 15-Jan-2022].
- [55] LaserVall, «Laservall's VIOLINO Series DPSS Nd:YVO4 OEM Laser Sources», *Laservall's VIOLINO*, 2019. [Online]. Disponível em: http://laservall-usa.com/products/marketing/violino_marker/index.php. [Acedido: 15-Jan-2022].
- [56] H. Qiu, W. Bao, e C. Lu, «Investigation of laser parameters influence of direct-part marking data matrix symbols on aluminum alloy», em *Applied Mechanics and Materials*, vol. 141, n. 1, pp. 328–333, 2012.
- [57] W. Jangsombatsiri e J. D. Porter, «Artificial neural network approach to Data Matrix laser direct part marking», *J. Intell. Manuf.*, vol. 17, n. 1, pp. 133–147, 2006.
- [58] L. Santo, F. Trovalusci, e J. Davim, «Laser Applications in the Field of Plastics», em *Comprehensive Materials Processing*, Amsterdam, Netherlands: Elsevier, pp. 243–260, 2014. ISBN: 978-0080965321
- [59] C. Leone, S. Genna, G. Caprino, e I. De Iorio, «AISI 304 stainless steel marking by a Q-switched diode pumped Nd:YAG laser», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, n. 10, pp. 1297–1303, 2010.
- [60] J. Qi, K. Wang, e Y. Zhu, «A study on the laser marking process of stainless steel», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 139, n. 1–3, pp. 273–276, 2003.
- [61] V. Javale e V. Nair, «A Review on Laser marking by Nd-Yag Laser and Fiber

- Laser», *Int. J. Sci. Res. Dev.*, vol. 1, n. 9, pp. 95–97, 2013.
- [62] D. K. Patel e D. M. Patel, «Parametric Optimization of Laser Engraving Process for different Material using Grey Relational Technique - A Review», *IJESRT - Int. J. Eng. Sci. Res. Technol.*, vol. 3, n. 4, pp. 1–5, 2014.
- [63] A. Han e D. Gubencu, «Analysis of the laser marking technologies», *Nonconv. Technol. Rev.*, vol. 12, n. 4, pp. 17–22, 2008.
- [64] TROTEC, «A comprehensive guide to industrial laser applications», *Handbook to Industrial Laser Applications*, 2019. [Online]. Disponível em: https://www.troteclaser.com/static/images/News/EN_US/2016-11-Industrial-application-guide/Industrial_Application_guide.pdf. [Acedido: 15-Abr-2022].
- [65] Universal Laser Systems, «Conceito de distância focal, intervalo de focagem e ponto focal», *Lentes disponíveis*, 2020. [Online]. Disponível em: <https://www.ulsinc.com/es/lentes-disponibles>. [Acedido: 22-Fev-2022].
- [66] Welle Laser, «Principais parâmetros para uma marcação a laser ideal», *Como conseguir o melhor resultado na marcação a laser?*, 2018. [Online]. Disponível em: <https://wellelaser.com/principais-parametros-para-uma-marcacao-a-laser-ideal/>. [Acedido: 22-Fev-2022].
- [67] F. Brihmat-Hamadi, E. H. Amara, L. Lavisse, J. M. Jouvard, E. Cicala, e H. Kellou, «Surface laser marking optimization using an experimental design approach», *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 123, n. 4, pp. 1–13, 2017.
- [68] Ş. Kasman e I. E. Saklakoğlu, «Experimental Investigation and Mathematical Modeling of Laser Deep Engraving Process for Microapplication», *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 38, n. 6, pp. 1539–1549, 2013.
- [69] E. Ahearne, «Engineering the surface for direct part marking (DPM)», *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 29, n. 1, pp. 1–10, 2020.
- [70] Welle Laser, «Sobre marcação e gravação a laser», *Rastreabilidade*, 2021. [Online]. Disponível em: <https://wellelaser.com/sobre-marcacao-e-gravacao-a-laser/>. [Acedido: 20-Mai-2022].
- [71] N. Brown, «Introduction to Barcode Verification», *Improve code quality to meet industry and application standards*, 2019. [Online]. Disponível em: https://idsystems.ch/fileadmin/user-upload/3-Produkte/Barcodepruefgeraet/Cognex_8070V_Whitepaper_Intro_to_Barcode_Verification_EN.PDF. [Acedido: 20-Mai-2022].
- [72] L. Karrach e E. Pivarčiová, «Comparative study of data matrix codes localization and recognition methods», *J. Imaging*, vol. 7, n. 9, pp. 1–18, 2021.
- [73] L. Karrach e E. Pivarčiová, «Recognition of Data Matrix Codes in Images and their Applications in Production Processes», *Manag. Syst. Prod. Eng.*, vol. 28, n. 3, pp. 154–161, 2020.
- [74] Domino Printing Sciences, «2D Codes Explained», *What's the difference between a Data Matrix Code and a QR Code?*, 2021. [Online]. Disponível em:

- <https://www.domino-printing.com/en/blog/2021/the-difference-between-a-data-matrix-code-and-a-qr-code>. [Acedido: 20-Mai-2022].
- [75] K. Tremblay, «Data Matrix Codes vs. QR Codes – What is the difference?», *Laserax*, 2019. [Online]. Disponível em: <https://www.laserax.com/blog/data-matrix-vs-qr-codes>. [Acedido: 20-Mai-2022].
- [76] GS1, «2D Barcode Verification Process», *Implementation Guideline*, 2015. [Online]. Disponível em: <https://www.gs1.org/barcodes/guideline/2d-barcode-verification-process-implementation-guideline>. [Acedido: 20-Mai-2022].
- [77] ISO/IEC 29158, *Information technology - Automatic identification and data capture techniques - Direct Part Mark (DPM) Quality Guideline*. 2020.
- [78] P. D. D. M. Patel K. Dharmesh, «Analysis the effect of laser engraving process for surface roughness measurement on stainless steel (304)», *Int. J. Adv. Sci. Tech. Res.*, vol. 3, n. 4, pp. 725–730, 2014.
- [79] U. A. Dabade e R. C. Bhedasgaonkar, «Casting defect analysis using design of experiments (DoE) and computer aided casting simulation technique», *Procedia CIRP*, vol. 7, n. 1, pp. 616–621, 2013.
- [80] W. H. Yang e Y. S. Tarng, «Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 84, n. 1–3, pp. 122–129, 1998.
- [81] B. Durakovic, «Design of experiments application, concepts, examples: State of the art», *Period. Eng. Nat. Sci.*, vol. 5, n. 3, pp. 421–439, 2017.
- [82] S. A. Weissman e N. G. Anderson, «Design of Experiments (DoE) and Process Optimization. A Review of Recent Publications», *Org. Process Res. Dev.*, vol. 19, n. 11, pp. 1605–1633, 2015.
- [83] D. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control (6th edition)*. New Jersey, USA: Wiley, 2008. ISBN: 978-0470169926
- [84] I. M. Fukuda, C. F. F. Pinto, C. D. S. Moreira, A. M. Saviano, e F. R. Lourenço, «Design of experiments (DoE) applied to pharmaceutical and analytical quality by design (QbD)», *Brazilian J. Pharm. Sci.*, vol. 54, n. 1, pp. 1–16, 2018.
- [85] J. A. Ghani, I. A. Choudhury, e H. H. Hassan, «Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 145, n. 1, pp. 84–92, 2004.
- [86] P. Castro, «Método de Taguchi: Controlo de qualidade com recurso não convencional ao desenho estatístico de experiências (DOE)», *Rev. Estatística IPAM*, 2001. [Online]. Disponível em: https://www.ine.pt/ngt_server/attachfileu.jsp?look_parentBoui=106704&att_display=n&att_download=y. [Acedido: 15-Abr-2022].
- [87] Bosch, «The armature in a circle», *The creation of the Bosch logo*, 2021. [Online]. Disponível em: <https://www.bosch.com/stories/creation-of-the-bosch-logo/>. [Acedido: 13-Out-2021].

- [88] Bosch, «The story of our success», *Company History*, 2021. [Online]. Disponível em: <https://www.bosch.com/company/our-history/>. [Acedido: 13-Out-2021].
- [89] Bosch, *Intranet*. Publicação Interna, 2021.
- [90] Bosch, «Condução autónoma segura com a Bosch: centímetros que fazem toda a diferença», *Sistema para localização de veículos*, 2021. [Online]. Disponível em: <https://www.bosch.pt/noticias-e-historias/conducao-autonoma-segura-com-a-bosch-centimetros-que-fazem-toda-a-diferenca/>. [Acedido: 15-Out-2021].

ANEXOS

- 7.1 Anexo A - Ficha técnica do material
- 7.2 Anexo B - Composição do material
- 7.3 Anexo C - Classes do material Ultradur® (PBT)
- 7.4 Anexo D - Ficha técnica do equipamento de fonte *laser*
- 7.5 Anexo E - Imagens dos códigos analisados

7 ANEXOS

7.1 Anexo A - Ficha técnica do material

CAMPUS® Ficha de especificação

Ultradur® B 4406 G6 - PBT-GF30 FR
BASF



Informação do produto

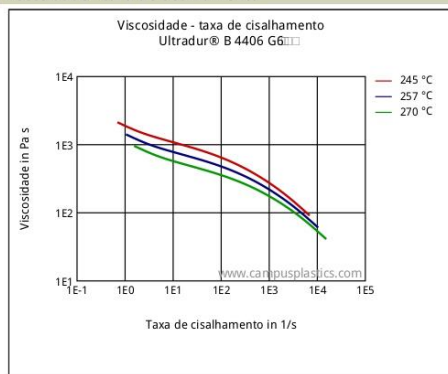
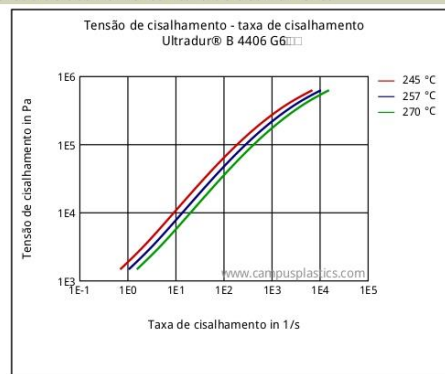
Injection molding grade with 30 % glass fibers for parts requiring enhanced fire resistance (eg potentiometer parts, plug-and-socket connectors, switches).

Abbreviated designation according to ISO 1043-1: PBT FR(17)

Propriedades reológicas	Valor	Unidade	Método de ensaio
Índice de fluidez volumétrico, MVR	8	cm ³ /10min	ISO 1133
Temperatura	275	°C	ISO 1133
Carga	2.16	kg	ISO 1133
Contração após a moldagem, paralelo	0.3	%	ISO 294-4, 2577
Contração após a moldagem, perpendicular	1.1	%	ISO 294-4, 2577
Propriedades mecânicas	Valor	Unidade	Método de ensaio
Módulo de tração	11300	MPa	ISO 527-1/-2
Tensão na ruptura	145	MPa	ISO 527-1/-2
Deformação na ruptura	2.3	%	ISO 527-1/-2
Módulo de tensão de fluência, 1000h	7500	MPa	ISO 899-1
Resistência ao impacto Charpy, +23°C	60	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Resistência ao impacto Charpy, -30°C	55	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Res. impacto Charpy c/entalhe, +23°C	10	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Propriedades térmicas	Valor	Unidade	Método de ensaio
Temperatura de fusão, 10°C/min	223	°C	ISO 11357-1/-3
Temperatura de deflexão térmica, 1.80 MPa	205	°C	ISO 75-1/-2
Temperatura de deflexão térmica, 0.45 MPa	220	°C	ISO 75-1/-2
Temperatura de amolecimento Vicat, 50°C/h 50N	223	°C	ISO 306
Coef. de expansão térmica linear, paralelo	23	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Coef. de expansão térmica linear, perpend.	97	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Flamabilidade UL94 a 1.5mm esp. nom.	V-0	class	IEC 60695-11-10
Espessuras do tubo de teste	1.6	mm	IEC 60695-11-10
Cartão Amarelo (yellow card) disponível	Yes	-	-
Flamabilidade UL94 a espessura h	V-0	class	IEC 60695-11-10
Espessuras do tubo de teste	0.4	mm	IEC 60695-11-10
Cartão Amarelo (yellow card) disponível	Yes	-	-
Flamabilidade UL94 5V a espessura h	5VA	class	IEC 60695-11-20
Espessuras do tubo de teste	1.5	mm	IEC 60695-11-20
Cartão Amarelo (yellow card) disponível	Yes	-	-
Flamabilidade conforme índice de oxigênio	32	%	ISO 4589-1/-2
Propriedades elétricas	Valor	Unidade	Método de ensaio
Constante dielétrica, 100Hz	3.9	-	IEC 62631-2-1
Constante dielétrica, 1MHz	3.9	-	IEC 62631-2-1
Fator de dissipação dielétrica, 100Hz	20	E-4	IEC 62631-2-1
Fator de dissipação dielétrica, 1MHz	150	E-4	IEC 62631-2-1
Resistividade volumétrica específica	1E13	Ohm*m	IEC 62631-3-1
Resistividade superficial específica	1E14	Ohm	IEC 62631-3-2
Resistência elétrica	40	kV/mm	IEC 60243-1

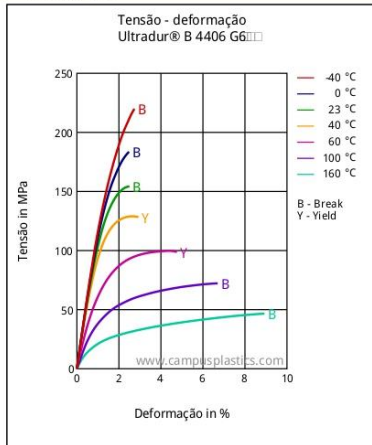
**Ultradur® B 4406 G6 - PBT-GF30 FR
BASF**

Índice comparativo de linha de fuga	200	-	IEC 60112
Outras propriedades	Valor	Unidade	Método de ensaio
Absorção de água	0.4	%	Sim. to ISO 62
Absorção de umidade	0.2	%	Sim. to ISO 62
Densidade	1650	kg/m ³	ISO 1183
Propriedades específicas do material	Valor	Unidade	Método de ensaio
Índice de viscosidade	108	cm ³ /g	ISO 307, 1157, 1628
Produção de amostra para teste	Valor	Unidade	Método de ensaio
Moldagem por injeção, temperatura da massa.	250	°C	ISO 294
Moldagem por injeção, temperatura do molde	80	°C	ISO 294
Moldagem por injeção, velocidade de injeção	200	mm/s	ISO 294

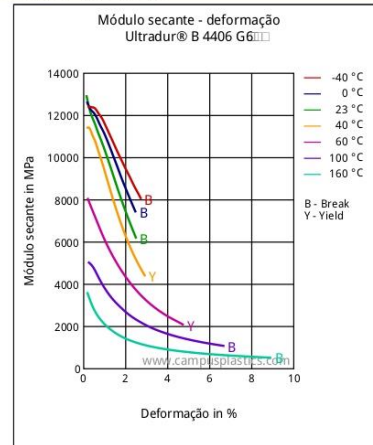
Diagrama
Viscosidade - taxa de cisalhamento

Tensão de cisalhamento - taxa de cisalhamento


Ultradur® B 4406 G6 - PBT-GF30 FR BASF

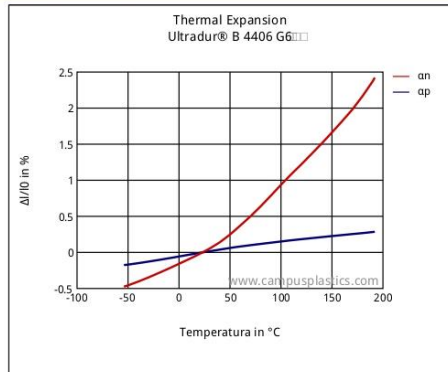
Tensão - deformação



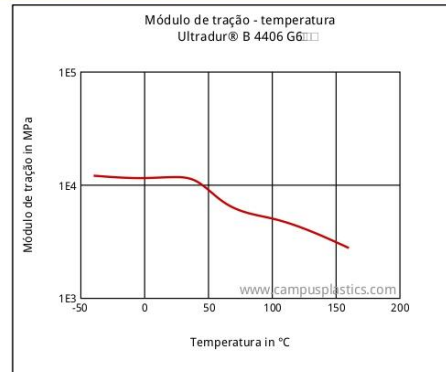
Módulo secante - deformação



Expansão térmica



Módulo de tração - temperatura



Características

Processamento

Moldagem por injeção

Forma de entrega

Granulos

Aditivos

Lubrificantes

Outras informações

Moldagem por injeção

PREPROCESSING

Características especiais

Estável a luz, Estabilidade a raios U.V./Intempéries, Estável contra o calor

Disponibilidade regional

América do Norte, Europa, Ásia Pacífico, America Centra e do Sul, Oriente/África

Ultradur® B 4406 G6 - PBT-GF30 FR
BASF

Pre/Post-processing, max. allowed water content: .04 %
 Pre/Post-processing, Pre-drying, Temperature: 80 - 120 °C
 Pre/Post-processing, Pre-drying, Time: 4 h

PROCESSING

injection molding, Melt temperature, range: 250 - 275 °C
 injection molding, Melt temperature, recommended: 260 °C
 injection molding, Mold temperature, range: 60 - 100 °C
 injection molding, Mold temperature, recommended: 80 °C
 injection molding, Dwell time, thermoplastics: 10 min

Resistência em meio químico

Ácidos

- ☺ Ácido Acético (5% em massa) (23°C)
- ☺ Solução de Ácido Cítrico (10% em massa) (23°C)
- ☺ Ácido Láctico (10% em massa) (23°C)

Bases

- ☹ Solução de Hidróxido de Sódio (35% em massa) (23°C)
- ☺ Solução de Hidróxido de Amônio (10% em massa) (23°C)

Álcoois

- ☺ Álcool isopropílico (23°C)
- ☺ Metanol (23°C)
- ☺ Etanol (23°C)

Hidrocarbonetos

- ☺ n-Hexano (23°C)
- ☺ Tolueno (23°C)
- ☺ Iso-Octano (23°C)

Cetonas

- ☹ Acetona (23°C)

Éteres

- ☺ Di-etil éter (23°C)

Óleos Minerais

- ☺ Óleo de motor multissérie SAE 10W40 (23°C)
- ☺ Óleo de motor multissérie SAE 10W40 (130°C)

Combustíveis Padrões

- ☺ Diesel (pref. Líquido F ISO 1817) (23°C)

Soluções de sais

- ☺ Solução de Carbonato de Sódio (2% em massa) (23°C)

Outras

- ☹ Acetato de Etila (23°C)
- ☺ Água (23°C)

The data contained in this publication are based on our current knowledge and experience. In view of the many factors that may affect processing and application of our product, these data do not relieve

**Ultradur® B 4406 G6 - PBT-GF30 FR
BASF**

processors from carrying out their own investigations and tests. Any descriptions, drawings, photographs, data, proportions, weights etc. given herein may change without prior information and do not constitute the agreed contractual quality of the product. It is the responsibility of the recipient of our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed. NO WARRANTIES OF ANY KIND, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ARE MADE REGARDING PRODUCTS DESCRIBED OR DESIGNS, DATA OR INFORMATION SET FORTH, OR THAT THE PRODUCTS, DESIGNS, DATA OR INFORMATION MAY BE USED WITHOUT INFRINGING THE INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS OF OTHERS.

In order to check the availability of products please contact us or our sales agency.

For more information about our products contact your local BASF representative or

BASF SE
Dept. PM/K
Fax: 0621-60-49497
e-mail: [e-mail](#)

CAMPUS® is a registered trademark of CWFG (Chemie Wirtschaftsfoerderungsgesellschaft GmbH, Frankfurt)

7.2 Anexo B - Composição do material

MDS Report Substances of assemblies and materials

1. Company, Product Name and Recipient data

1.1 Supplier Data

Name [ID]: **Celoplás, plasticos para Industria S.A. [17869]**
 DUNS Number: -
 Street: **Rua de São Mateus, N299**
 Nat./ZipCode/City: **PT 4775-127 Grimancelos**
 Supplier Code: -
 Contact Person: **Mendes,Catarina**
 - Phone: -
 - Fax: -
 - E-Mail Address: **catarina.mendes@celoplas.pt**

1.2 Product Identification

Part/Item No.: **8613014084**
 Description: **BUTTOM HOUSING ASSEMBLED**
 Weight: **119.6 g**
 Preliminary MDS: **No**
 IMDS ID / Version: **945468275 / 2.000**
 Node ID: **1000788336**
 MDS Status: **Internally Released**
 Status Change Date: **Mar 8, 2021**

1.3 Recipient Data

Recipient: **Robert Bosch GmbH [202]**
 Customer Part No.: **8613014084**
 Customer Part Name: **BUTTOM HOUSING ASSEMBLED**
 Drawing No.: **8613014084**
 Drawing Date: **26-01-2021**
 Drawing Chg. Level: **11**
 Report No.: -
 Date of Report:
 Bill of Delivery No.: -
 Sent: **Mar 4, 2021**
 Supplier Code: -
 Recipient Status: **Accepted**
 Status Change Date: **Mar 8, 2021**



MDS Report

Substances of assemblies and materials

2. Characterization of the Component

Part/Item No.: **8613014084**IMDS ID / Version.: **945468275 / 2.000**Description: **BUTTOM HOUSING ASSEMBLED**Node ID: **1000788336**

Tree Level	Description Article Name Name Substance name	Part/Item No. Item-/Mat.-No. Material-No. CAS No.	IMDS ID / Version	Quantity	Weight [g]	Portion [%]	Portion (from - to) [%]	Classif. GADSL, SVHC	Parts Marking Recyclate (Indust./Consumer) Application [ID]
1	BUTTOM HOUSING ASSEMBLED	8613014084	945468275 / 2.000	1	119.6				
- 2	Inserto Bottom Housing	2011881002_09809905		4	2.22				
- 3	CuZn39Pb3		8614759 / 6.000		2.22			3.2: Copper alloys	
- 4	Copper	7440-50-8					57.0 - 59.0	D	
- 4	Aluminium (metal)	7429-90-5					0.0 - 0.05		

Tree Level	Description Article Name Name Substance name	Part/Item No. Item-/Mat.-No. Material-No. CAS No.	IMDS ID / Version	Quantity	Weight [g]	Portion [%]	Portion (from - to) [%]	Classif. GADSL, SVHC	Parts Marking Recyclate (Indust./Consumer) Application [ID]
▲ - 4	Iron	7439-89-6					0.0 - 0.3		
▲ - 4	Nickel	7440-02-0					0.0 - 0.3	D	Not applicable [34]
▲ - 4	Lead	7439-92-1					2.5 - 3.5	D / P / SVHC	3 - Alloying element in copper [3]
▲ - 4	Tin	7440-31-5					0.0 - 0.3		
▲ - 4	Misc., not to declare	system					0.0 - 0.2		
▲ - 4	Zinc (metal)	7440-66-6				Rest 38.425			
📦 - 2	PBT-GF30 FR(17)	-		1	110.72				Parts marked as required on drawing.
🌍 - 3	PBT-GF30 FR(17)		499173139 / 2.000		110.72			5.1.a: filled Thermoplastics	
▲ - 4	Further Additives, not to declare	system				1.5			
▲ - 4	PBT					Rest 49.0			
▲ - 4	Antimonytrioxide	1309-64-4				5.5		D	
▲ - 4	GF-Fibre					30.0			
▲ - 4	Carbon black	1333-86-4				1.0			
▲ - 4	Halogenated compound ISO 1043-4, not declarable					13.0			

Legend

🌍 Multi Sourced Component



7.3 Anexo C - Classes do material Ultradur® (PBT)



Ultradur® (PBT)
Product Range

Ultradur® in the web: www.ultradur.de

BASF
We create chemistry

18 ULTRADUR®
Flame-retardant grades

Ultradur® Grades

Flame-retardant grades

Typical values at 23 °C for uncolored products	Unit	Test method	B 4406
Product Features			
Symbol	–	ISO 1043	PBT FR
Colors: uncolored (UN), black (BK)	–	–	UN
Density	kg/m ³	ISO 1183	1,450
Viscosity number, solution 0.005 g/ml phenol/1,2-dichloro benzene (1:1)	cm ³ /g	ISO 1628	123
Water absorption, saturation in water at 23 °C	%	similar to ISO 62	0.4
Moisture absorption, saturation in standard atmosphere 23 °C/50% r.h.	%	similar to ISO 62	0.25
Processing methods			
Melting temperature, DSC	°C	ISO 11357-1/-3	223
Melt volume rate MVR 250 / 2.16	cm ³ /10 min	ISO 1133	
Melt volume rate MVR 275 / 2.16	cm ³ /10 min	ISO 1133	30
Melt temperature range, injection-molding	°C	–	245-270
Mold temperature range, injection-molding	°C	–	40-70
Melt temperature range, extrusion	°C	–	
Molding shrinkage, free, longitudinal/transversal	%	ISO 2577, 294-4	
Fire behavior			
Flammability according to UL94 (thickness) ¹⁾	class (mm)	UL94	V0 (≥ 0.4)
Flammability (thickness)	class (mm)	IEC 60695-11-10	
Flammability of materials in cars at d ≥ 1 mm thickness ²⁾	–	FMVSS 302	+
Mechanical properties			
Tensile modulus of elasticity	MPa	ISO 527-1/-2	3,000
Tensile stress at yield (v=50 mm/min), stress at break* (v=5 mm/min)	MPa	ISO 527-1/-2	65
Strain at yield (v=50 mm/min)	%	ISO 527-1/-2	3.9
Nominal strain at break (v=50 mm/min), strain at break* (v=5 mm/min)	%	ISO 527-1/-2	5.3
Tensile creep modulus, 1,000h, elongation ≤ 0.5 %, +23 °C	MPa	ISO 899-1	
Flexural modulus	MPa	ISO 178	
Flexural strength	MPa	ISO 178	
Charpy impact strength (23 °C) ³⁾	kJ/m ²	ISO 179/1eU	50
Charpy impact strength (-30 °C) ³⁾	kJ/m ²	ISO 179/1eU	
Charpy notched impact strength (23 °C) ³⁾	kJ/m ²	ISO 179/1eA	4
Charpy notched impact strength (-30 °C) ³⁾	kJ/m ²	ISO 179/1eA	4
Ball indentation hardness H 358 N/30sec, H 961 N/30sec*	MPa	ISO 2039-1	120
Thermal properties			
Heat deflection temperature under 1.8 MPa (HDT/A)	°C	ISO 75-1/-2	60
Heat deflection temperature under 0.45 MPa (HDT/B)	°C	ISO 75-1/-2	170
Max. service temperature (short cycle operation) ⁴⁾	°C	–	200
Temperature index, at 50% loss of tensile strength after 20,000h/5,000h	°C	IEC 60216-1	110/135
Thermal coefficient of linear expansion, longitudinal (23-80) °C	10 ⁻⁶ /K	ISO 11359-1/-2	50
Thermal conductivity (23 °C)	W(m·K)	DIN 52 612-1	0.27
Specific heat capacity (23 °C)	J/(kg·K)		1,200
Electrical properties			
Dielectric constant at 100Hz/1MHz	–	IEC 60250	3.3/3.3
Dissipation factor at 100Hz/1MHz	10 ⁻⁴	IEC 60250	110/170
Volume resistivity	Ω·m	IEC 60093	10 ¹⁴
Surface resistivity	Ω	IEC 60093	10 ¹³
Comparative tracking index CTI, test solution A	–	IEC 60112	250
Available versions			
Laser-markable (LS)/Laser-transparent (LT)	–	–	

¹⁾ yellow card available

²⁾ + = passed

³⁾ NB = no break

⁴⁾ Typical values for parts required to withstand repeated exposure to this temperature for several hours over years of use, assuming appropriate shaping and processing for the material.

Grades with special properties

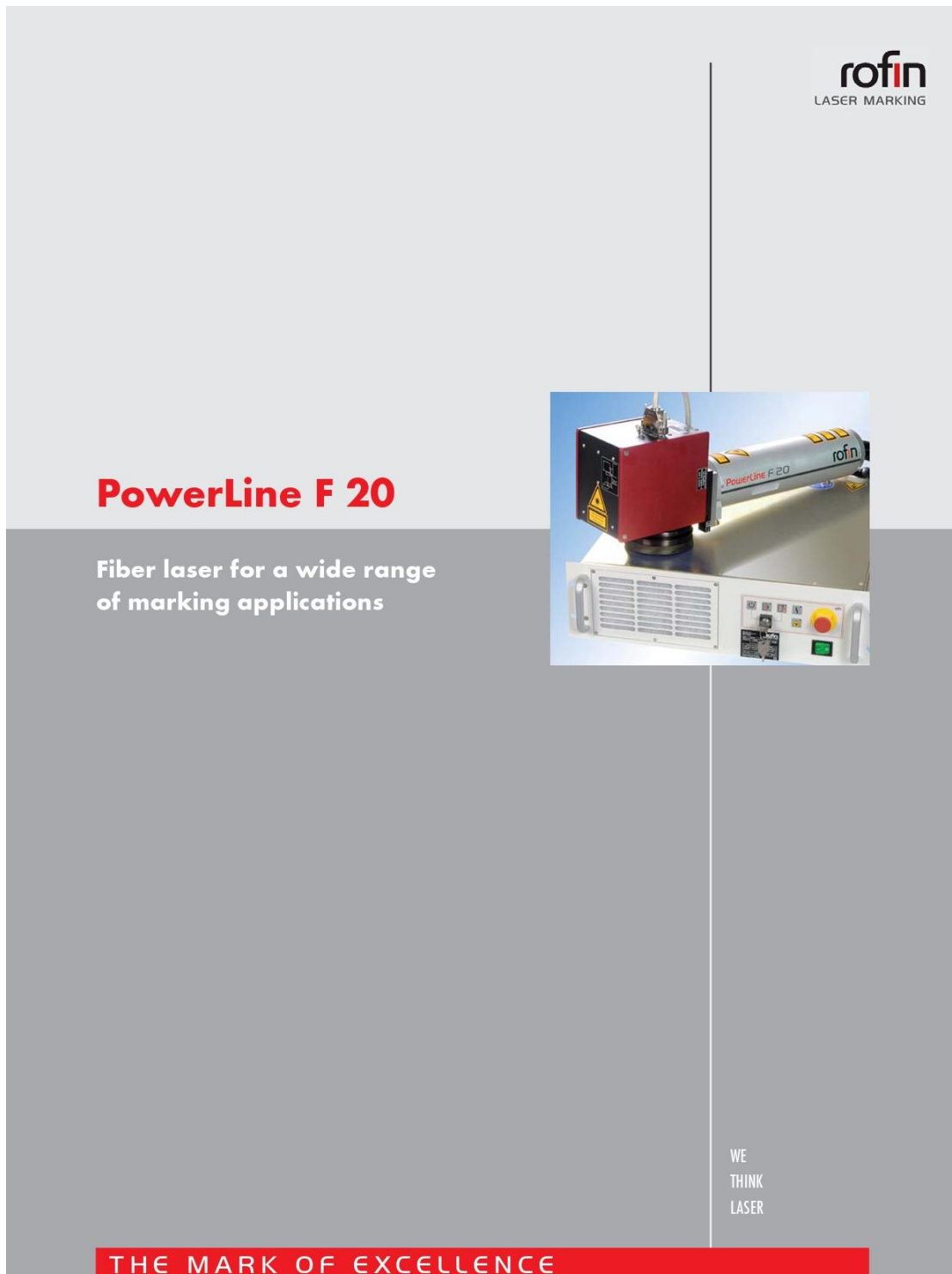
LS	Laser-markable products; can be marked with a Nd:YAG laser (1064 nm).
LT	Laser-transparent grades with specified laser transparency; for radiation in the near infrared area (800-1100 nm), e.g. of Nd:YAG or diode lasers.
FC/FC Aqua®	Products suitable for use in drinking water and/or food contact. They meet the regulatory requirements for the corresponding areas of use.
PRO	Products which meet the regulatory requirements in particular in the area of medical devices, such as insulin pens or inhalers.

B 4406 G2	B 4406 G4	B 4406 G6	B 4406 G6 High Speed	B 4441 G5	B 4450 G5	B 4450 G5 HR
PBT-GF10 FR	PBT-GF20 FR	PBT-GF30 FR	PBT-GF30 FR	PBT-GF25 FR	PBT-GF25 FR	PBT-GF25 FR
UN	UN, BK	UN, BK	BK	UN, BK	UN, BK	
1,520	1,600	1,650	1,700	1,530	1,600	1,580
120	116	108	90	105	100	110
0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
223	223	223	223	223	223	223
15	11	8	12	15	17	20
250-275	250-275	250-275	250-280	260-280	260-280	260-280
60-100	60-100	60-100	60-100	60-100	60-100	60-100
			0.3/1.1	0.44/1.24	0.5/1.3	
V0 (≥ 0.4)	V0 (≥ 0.4)	V0 (≥ 0.4)	V0 (≥ 0.4)	V0 (≥ 0.4)	V2 (≥ 0.4)	V2 (≥ 0.4)
+	+	+	+	+	+	+
5,500	8,200	11,300	11,700	9,800	10,000	8,400
95*	125*	145*	140*	110*	110*	110*
3.3*	2.6*	2.3*	1.9*	2.3*	2.2*	2.6*
		7,500	11,300	10,000	9,700	
			200	180	180	
40	48	60	50	45	45	50
40	50	55		47	45	39
5	8	10	7	7	6	6
	190*	220*				
190	200	205	205	210	210	208
215	220	220	220	220	220	222
210	210	210		210		210
120/130	120/130	125/150				
50	28	20			20	
		0.32				
1,100	1,000	900	900	1,000	1,000	1,000
3.5/3.5	3.8/3.6	3.9/3.9		3.7/3.6	4/3.8	4.1/3.9
80/150	70/170	20/150		35/137	40/140	90/150
10 ¹⁴	10 ¹⁴	10 ¹⁴	>10 ¹⁵	10 ¹⁴	10 ¹⁴	>10 ¹³
10 ¹³	10 ¹³	10 ¹³	>10 ¹⁶	>10 ¹⁶	>10 ¹⁶	>10 ¹⁶
225	200	200	175	525	600	600
				LS	LS	

Grades with special properties

LS	Laser-markable products; can be marked with a Nd:YAG laser (1064 nm).
LT	Laser-transparent grades with specified laser transparency; for radiation in the near infrared area (800-1100 nm), e. g. of Nd:YAG or diode lasers.
FC/FC Aqua®	Products suitable for use in drinking water and/or food contact. They meet the regulatory requirements for the corresponding areas of use.
PRO	Products which meet the regulatory requirements in particular in the area of medical devices, such as insulin pens or inhalers.

7.4 Anexo D - Ficha técnica do equipamento de fonte *laser*



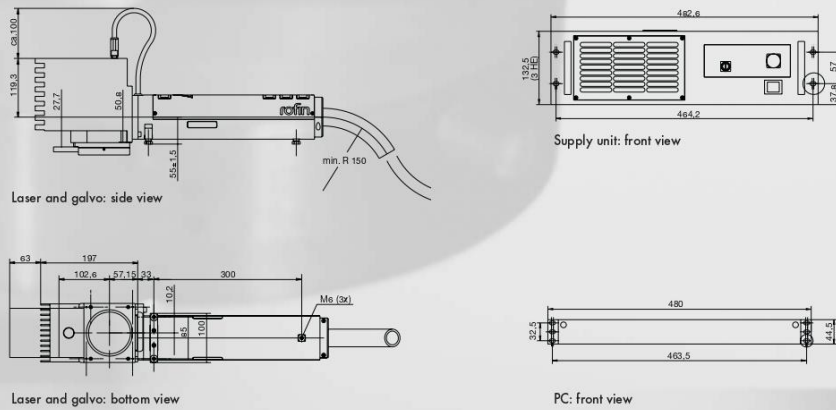
rofin
LASER MARKING

PowerLine F 20

Fiber laser for a wide range
of marking applications

WE
THINK
LASER

THE MARK OF EXCELLENCE



Technical Data

Laser head

Laser medium:	Yb
Wavelength:	1065 nm +/- 5 nm
Pulse frequency:	20 - 80 kHz
Dimensions:	length 380 mm, Ø 90 mm
Weight:	approx. 10 kg
Safety class:	IP 54

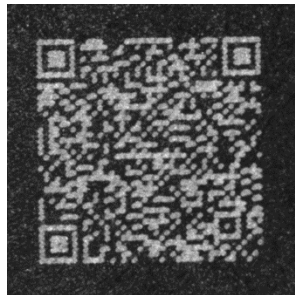
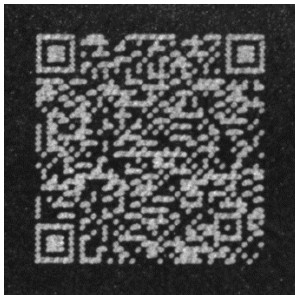
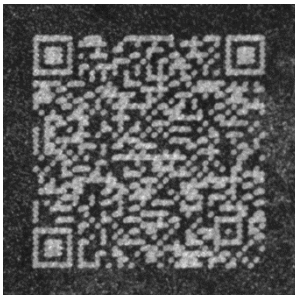
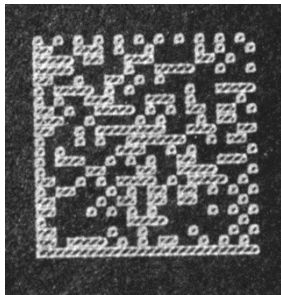
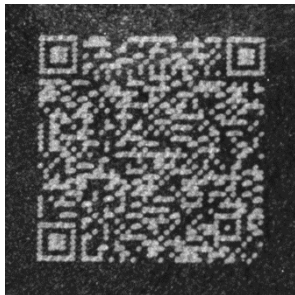
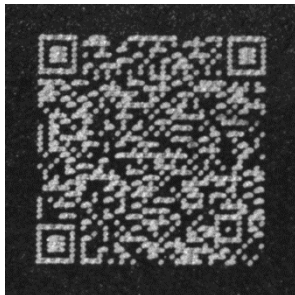
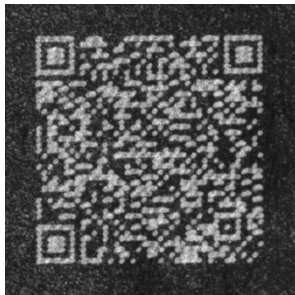
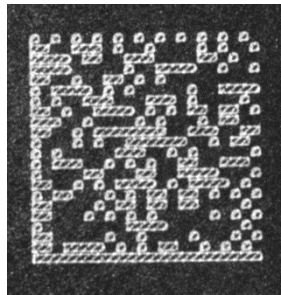
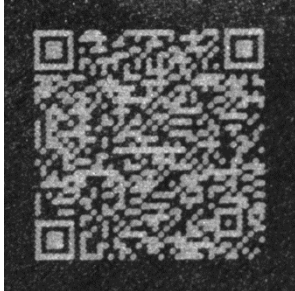
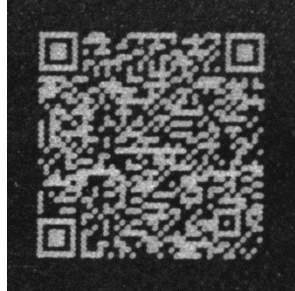
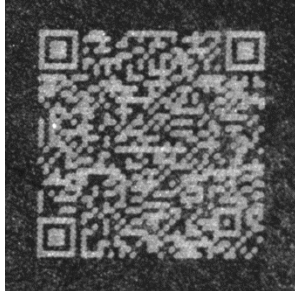
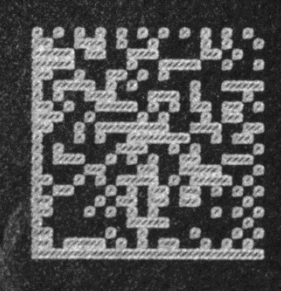
Marking unit

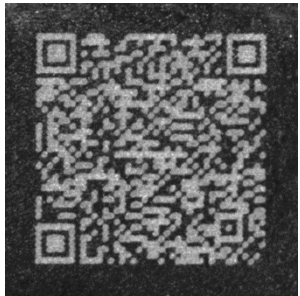
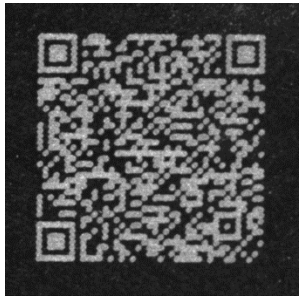
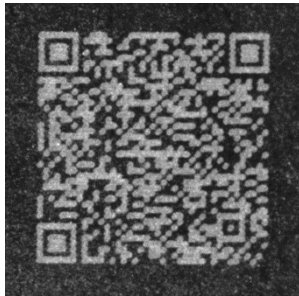
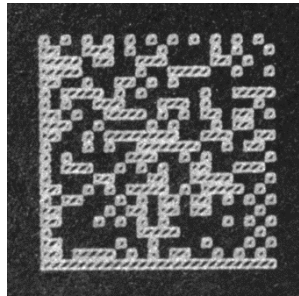

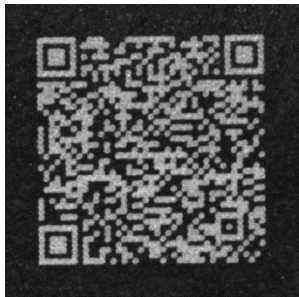
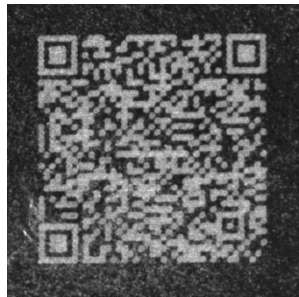
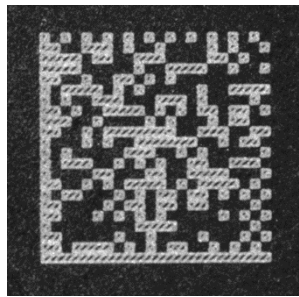
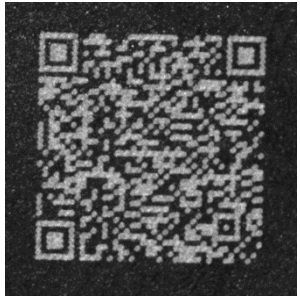
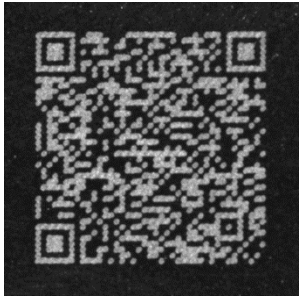
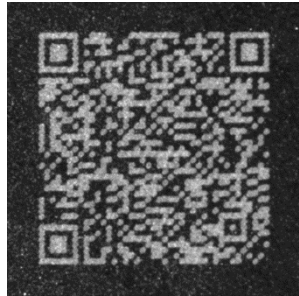
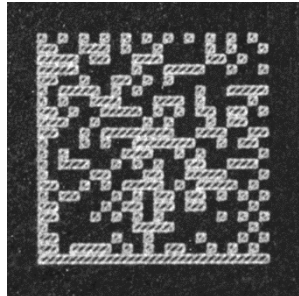
Field size:	120 x 120 mm
Focal distance:	160 mm (other focal distance on request)
Dimensions (L x W x H):	175 x 188 x 166 mm
Weight:	approx. 2.7 kg
Safety class:	IP 54

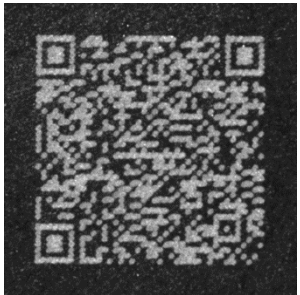
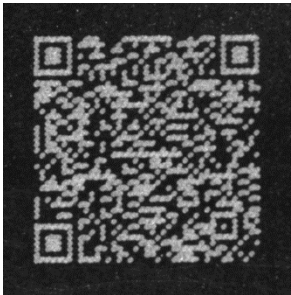
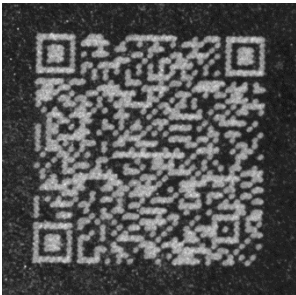
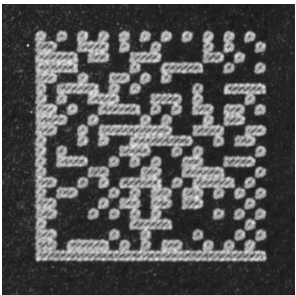
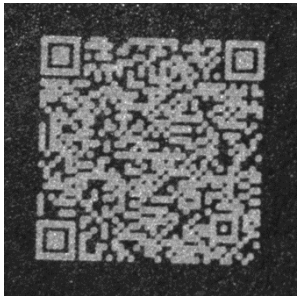
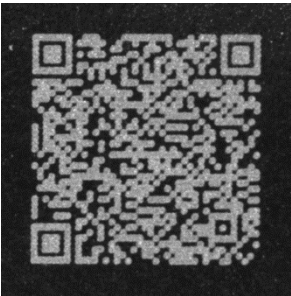
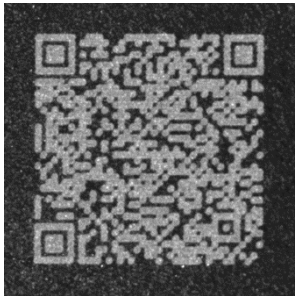
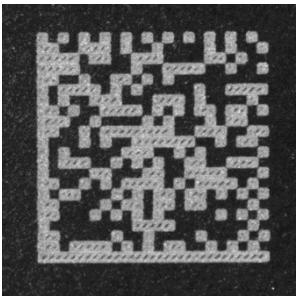
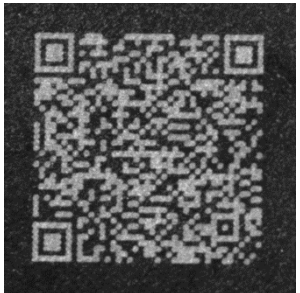
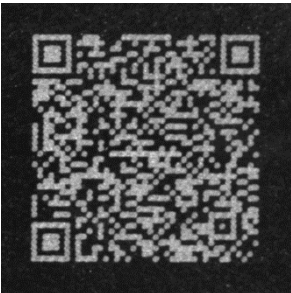
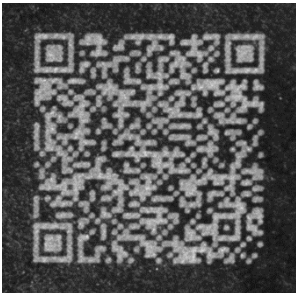
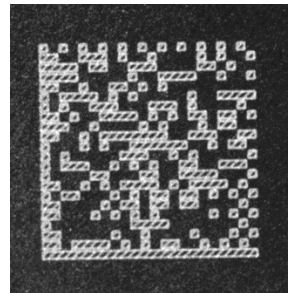
Supply unit and PC (19")

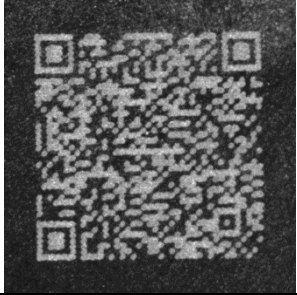
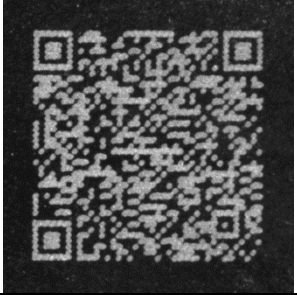
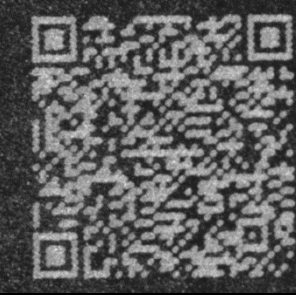
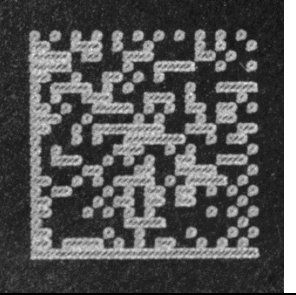
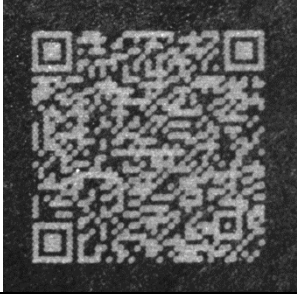
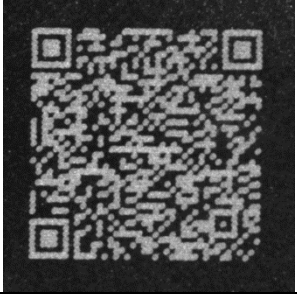
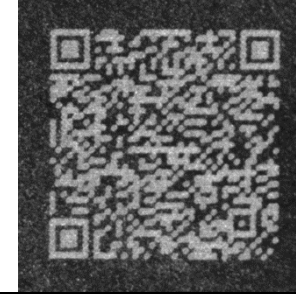
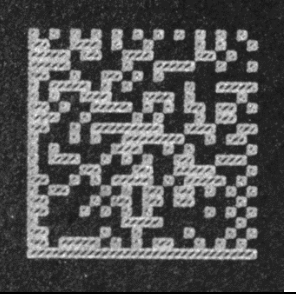
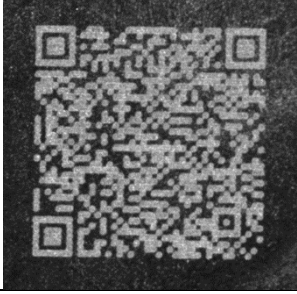
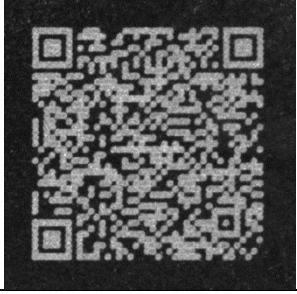
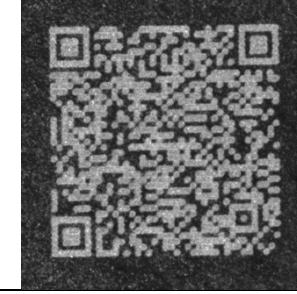
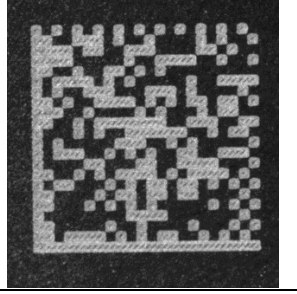
Supply unit:	460 mm x 19" x 3 rack units; 15 kg
PC:	440 mm x 19" x 1 rack unit; 10 kg Windows XP embedded, DVD RW, USB 2.0, LAN
Electric supply:	100 - 240 VAC, 50/60 Hz
Power consumption supply unit:	approx. 300 watts
Safety class:	IP 20
Operating temperature:	15° - 35° C

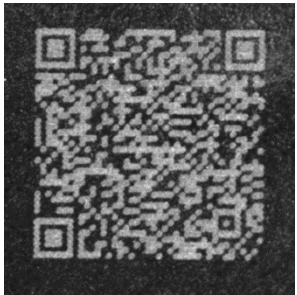
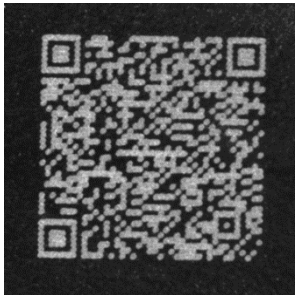
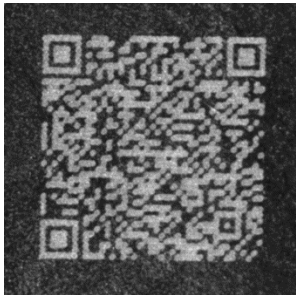
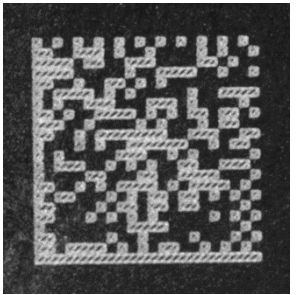
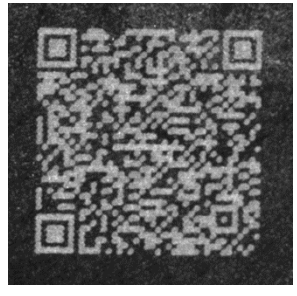
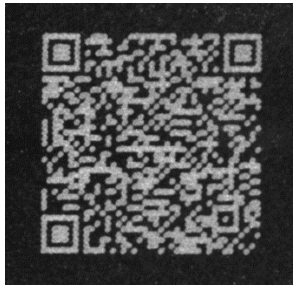
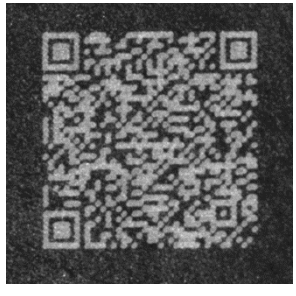
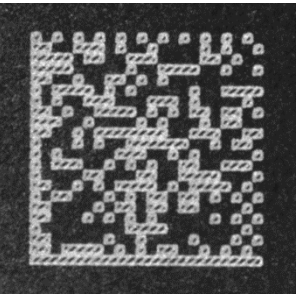
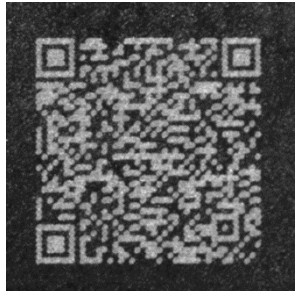
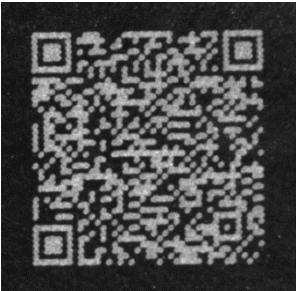
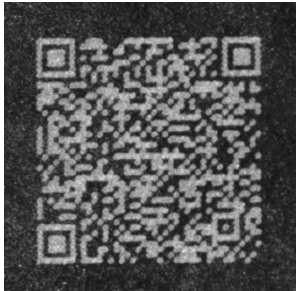
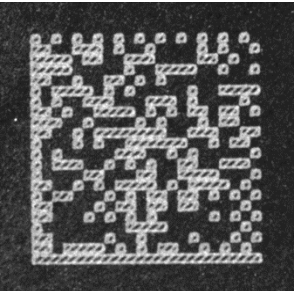
7.5 Anexo E - Imagens dos códigos analisados

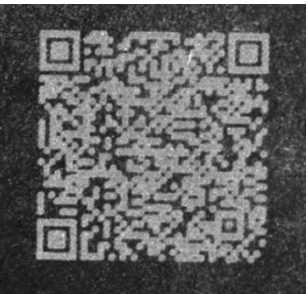
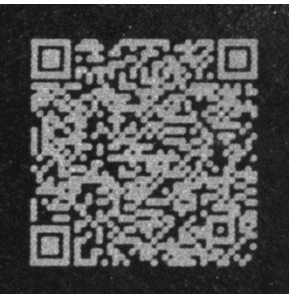
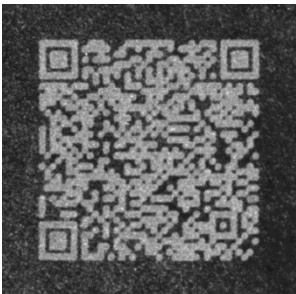
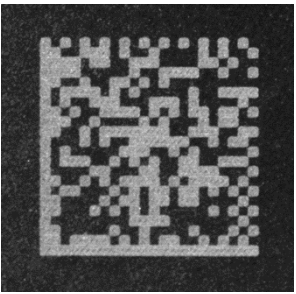
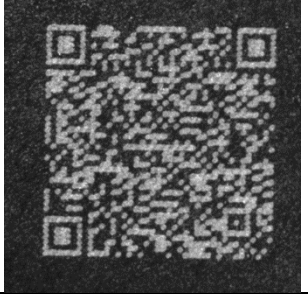
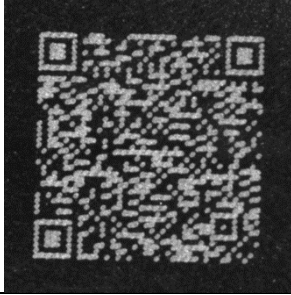
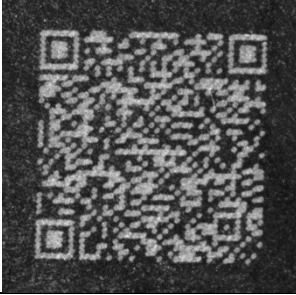
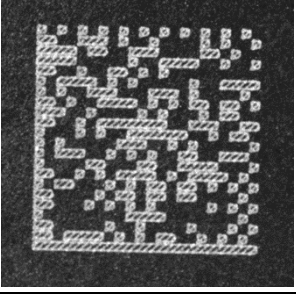
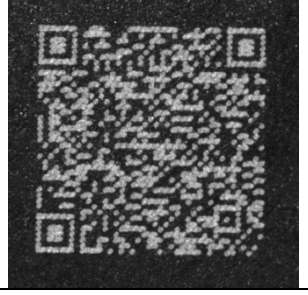
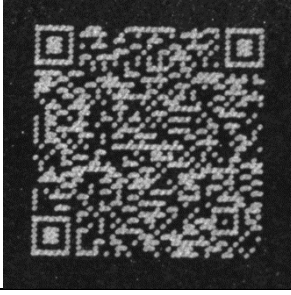
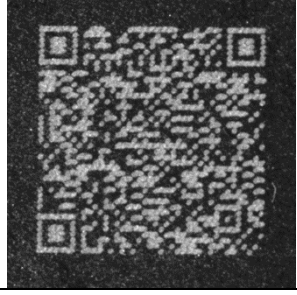
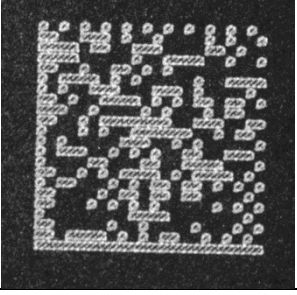
Nº	P (W)	F (Hz)	V (mm/s)	S (%)	Grade QR1	Grade QR2	Grade QR3	Grade DMC
1	17	25000	3000	0	B 	A 	C 	A 
2	15	25000	3000	0	C 	B 	C 	B 
3	15	30000	2000	30	B 	A 	D 	A 

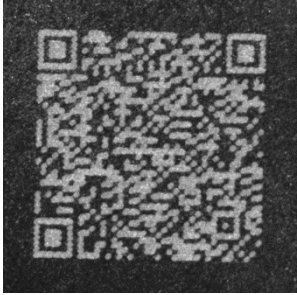
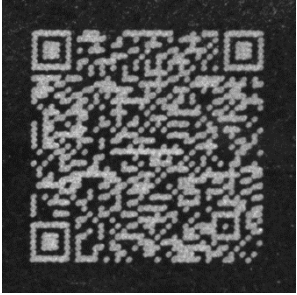
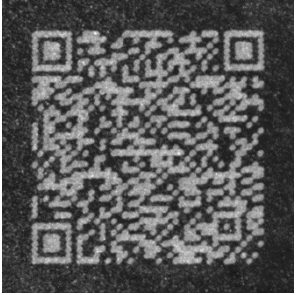
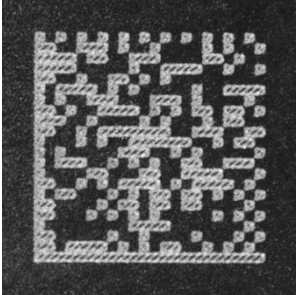
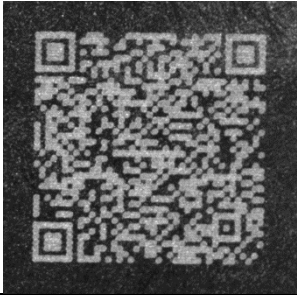
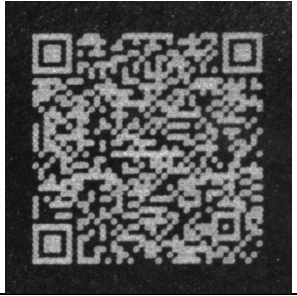
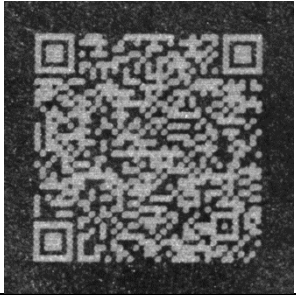
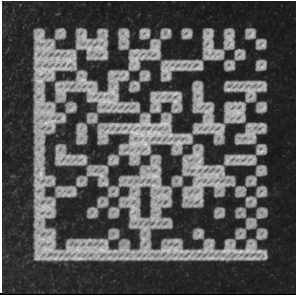
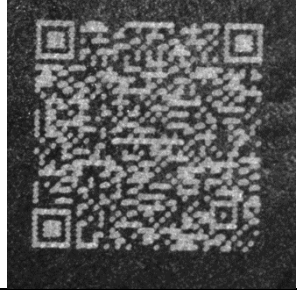
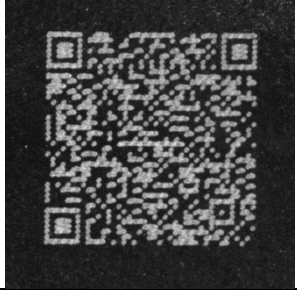
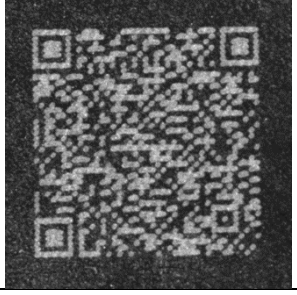
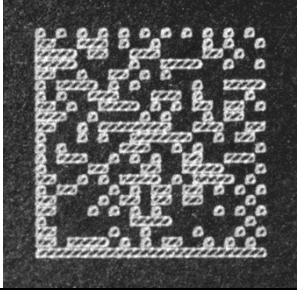
4	17	30000	2000	0	B 	A 	B 	A 
5	17	15000	1000	15	C 	A 	F 	A 
6	15	25000	2000	15	B 	A 	A 	A 

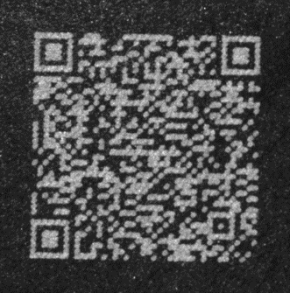
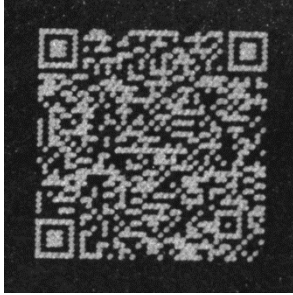
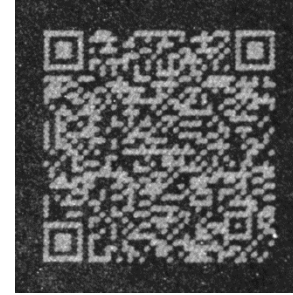
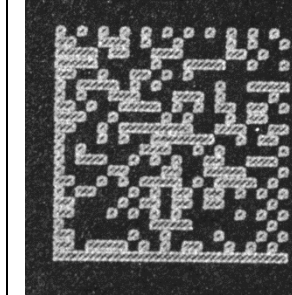
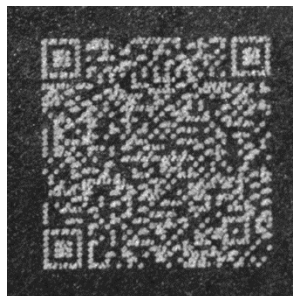
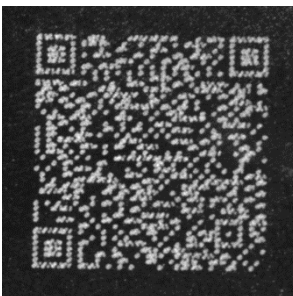
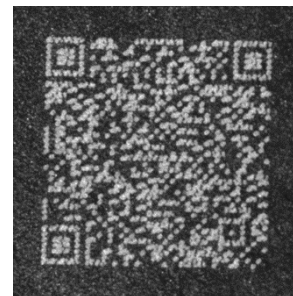
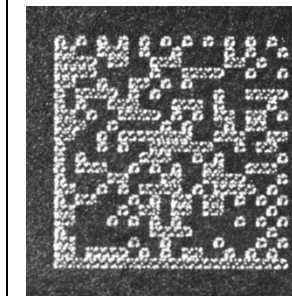
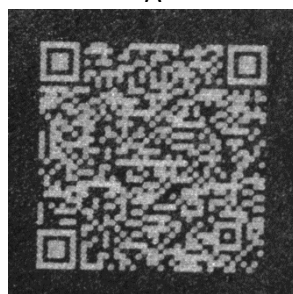
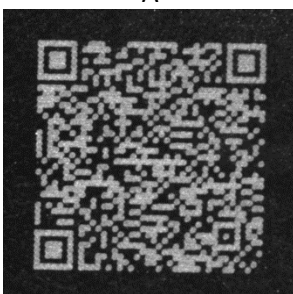
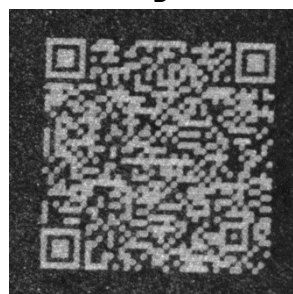
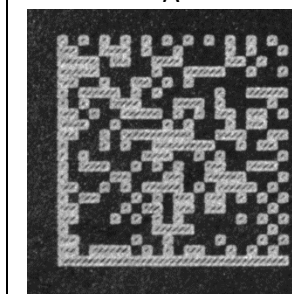
7	19	25000	3000	30	 B	 A	 B	 A
8	17	30000	1000	15	 B	 B	 C	 A
9	15	15000	1000	0	 B	 A	 B	 A


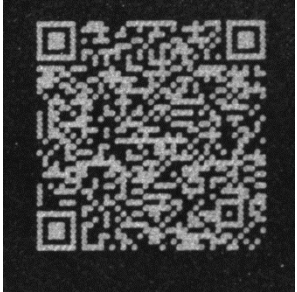

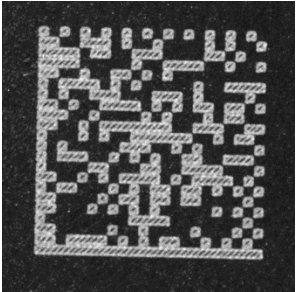
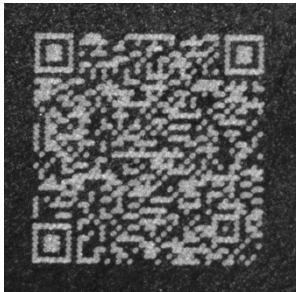
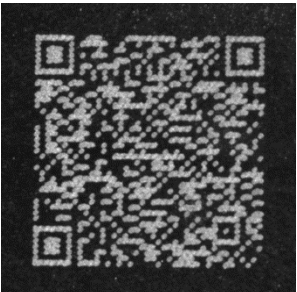
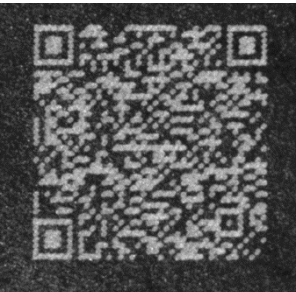
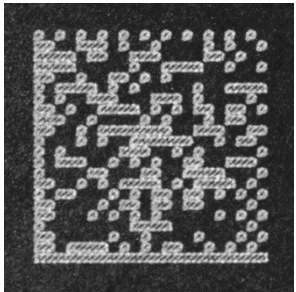
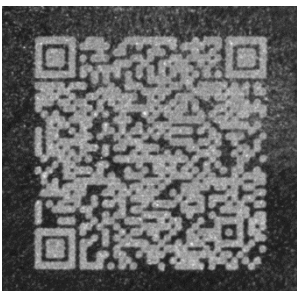
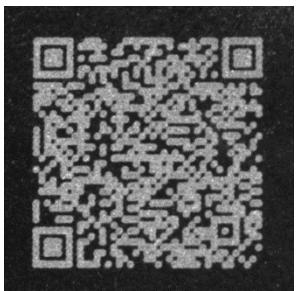
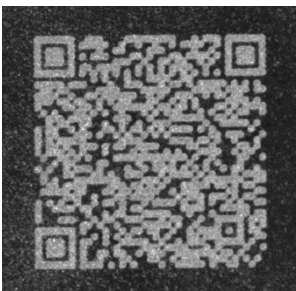
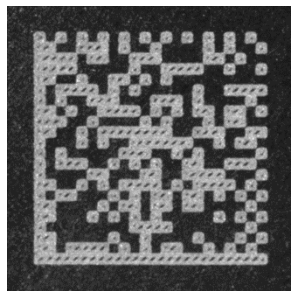
10	19	30000	3000	30	 C	 A	 C	 A
11	19	25000	2000	15	 C	 A	 B	 A
12	15	25000	1000	30	 C	 A	 B	 A


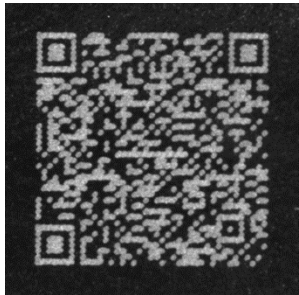
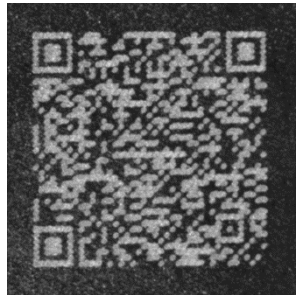
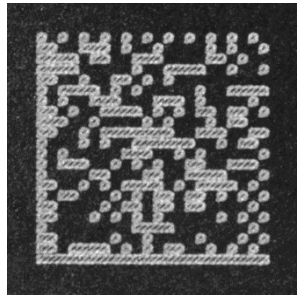
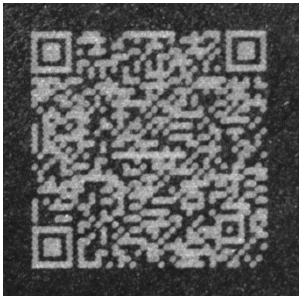
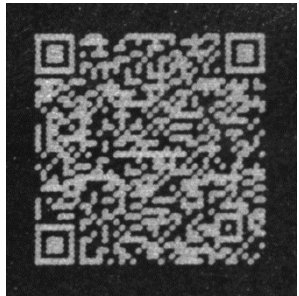
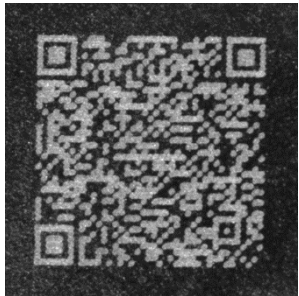
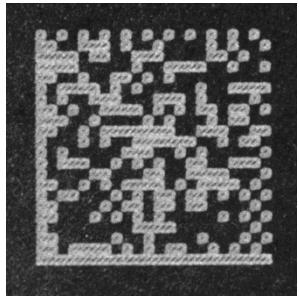
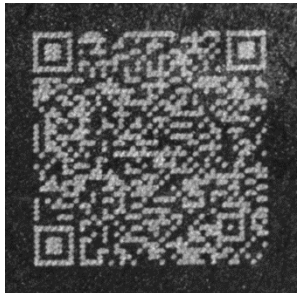
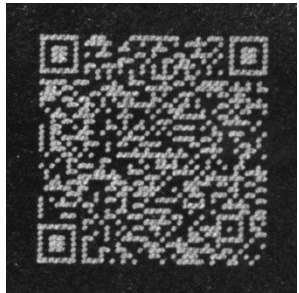
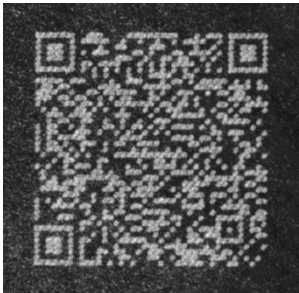
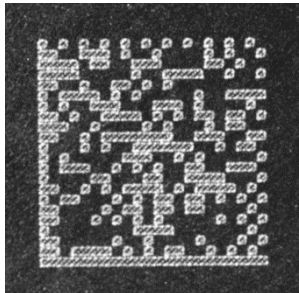
13	17	30000	2000	15	 C	 A	 B	 A
14	19	25000	2000	0	 D	 A	 B	 A
15	17	25000	2000	0	 B	 A	 B	 A

16	19	25000	1000	30	 D	 B	 D	 A
17	15	30000	3000	15	 B	 A	 B	 A
18	15	25000	3000	30	 B	 A	 B	 A

19	19	30000	3000	15	 B	 A	 B	 A
20	19	15000	1000	30	 C	 A	 B	 A
21	15	30000	3000	0	 C	 A	 B	 B

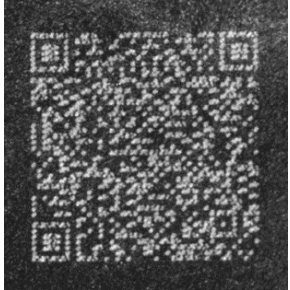
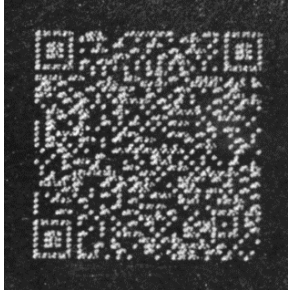
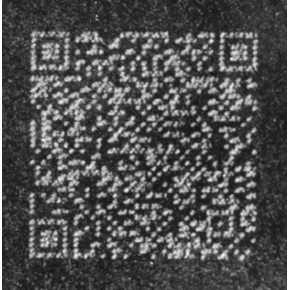
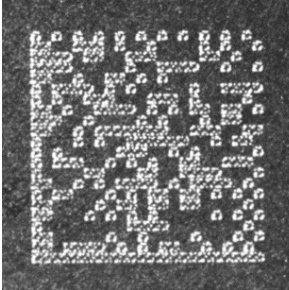
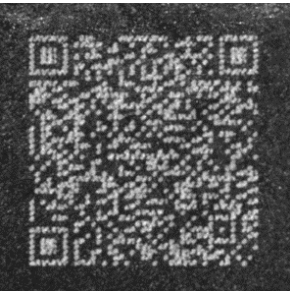
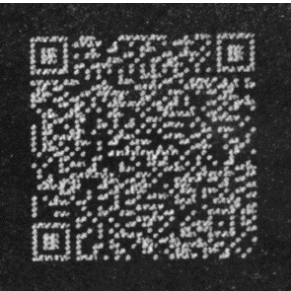
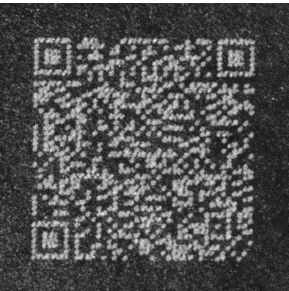
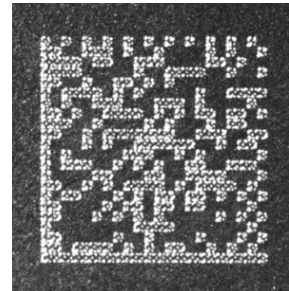
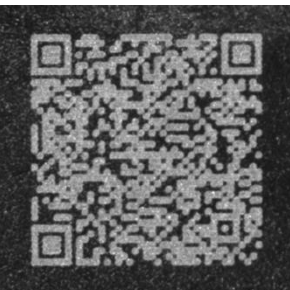
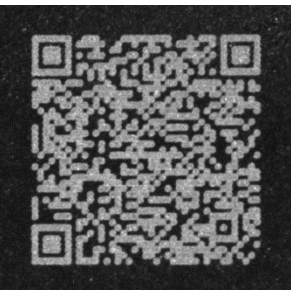
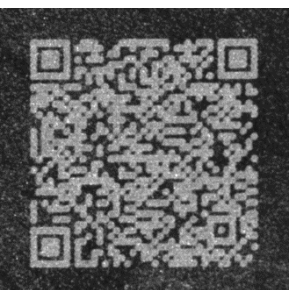
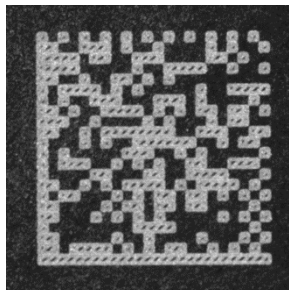
22	19	15000	2000	30	B 	A 	B 	A 
23	19	15000	3000	0	F 	F 	F 	B 
24	17	15000	1000	30	A 	A 	B 	A 

25	15	15000	1000	30	 B	 A	 B	 A
26	17	25000	3000	30	 B	 A	 B	 A
27	19	30000	1000	0	 D	 B	 B	 A

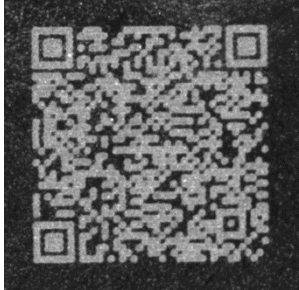
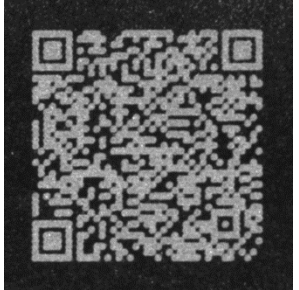
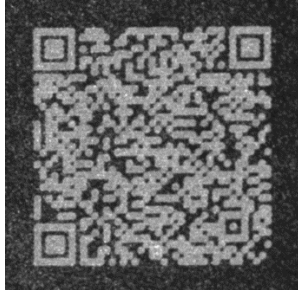
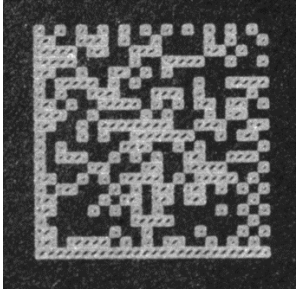



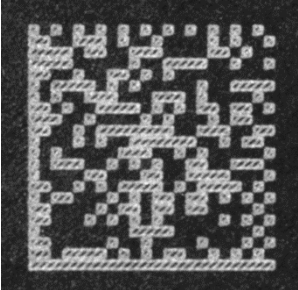
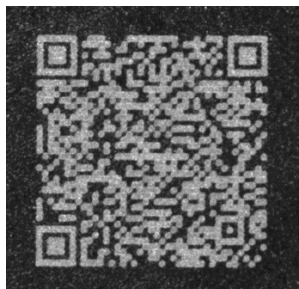
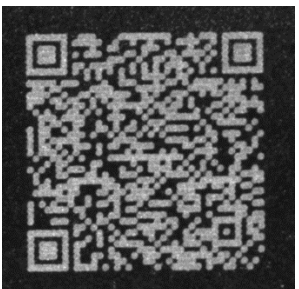
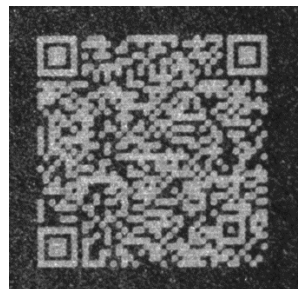
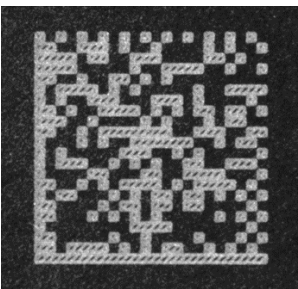
28	17	30000	3000	30	 B	 A	 A	 A
29	19	25000	2000	30	 B	 A	 C	 A
30	15	15000	2000	30	 D	 A	 C	 A

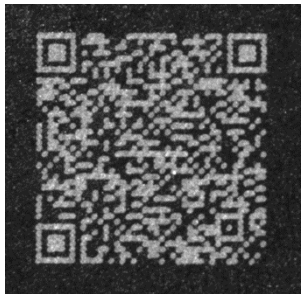
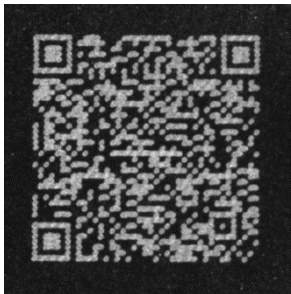
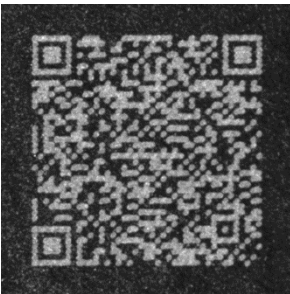
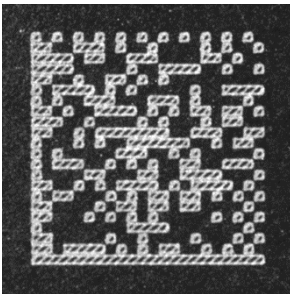
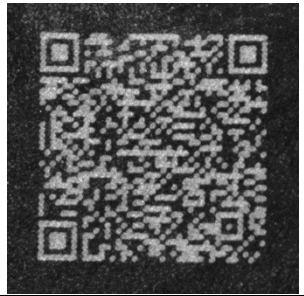
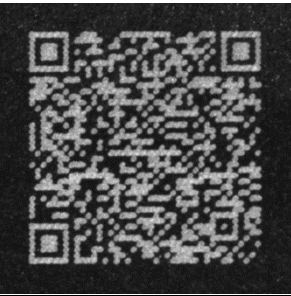
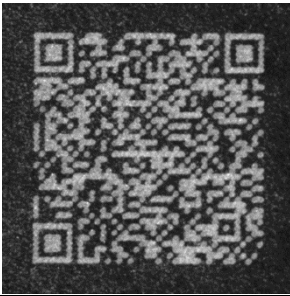
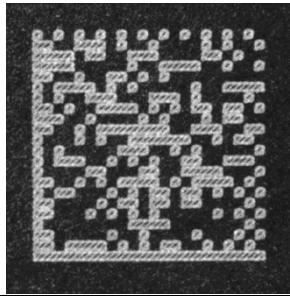
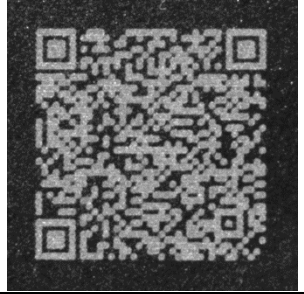
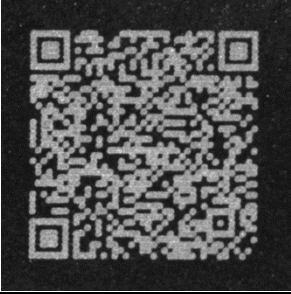
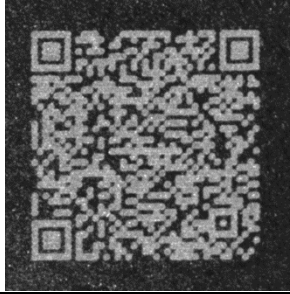
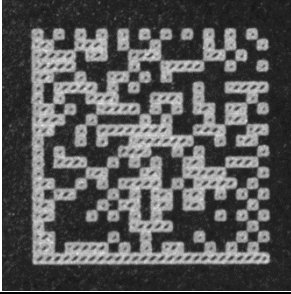
31	19	15000	2000	0	D	A	C	A
32	15	30000	1000	15	B	A	B	A
33	15	25000	3000	15	C	B	C	B

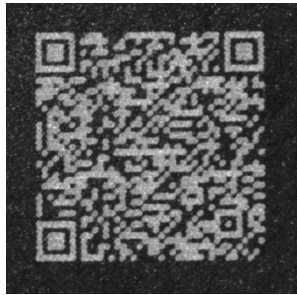
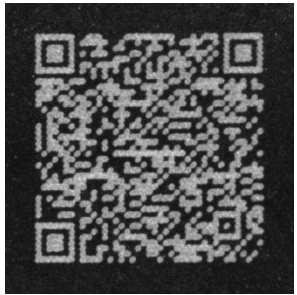
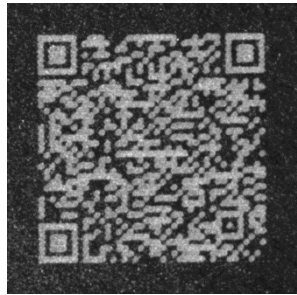
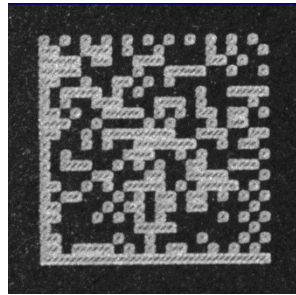
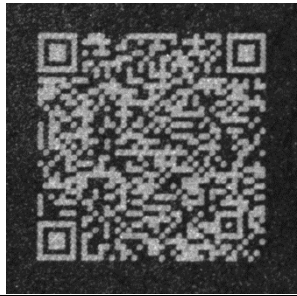
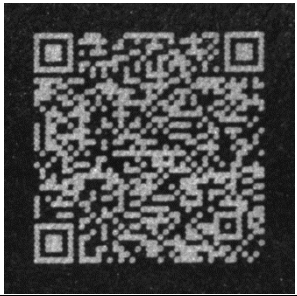
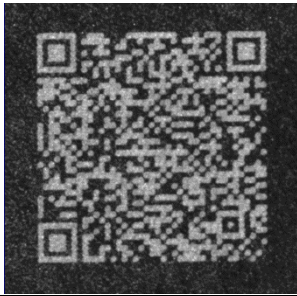
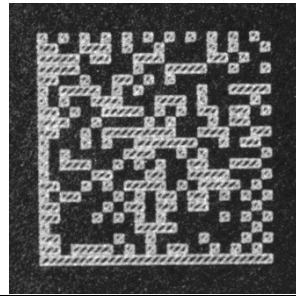
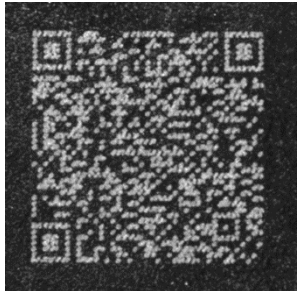
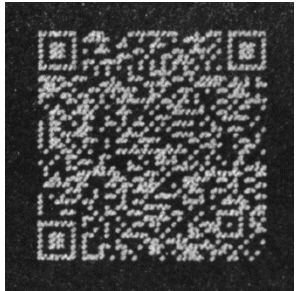
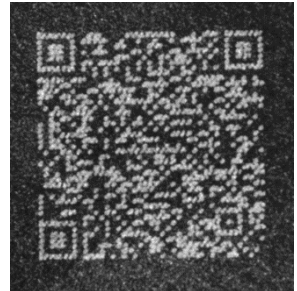
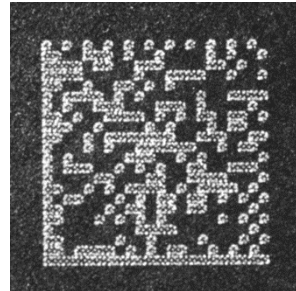
34	15	15000	3000	15	F	F	F	F
35	17	25000	3000	15	D	A	B	B
36	17	15000	3000	0	F	F	F	B

37	15	15000	3000	0	F		F		F		F	
38	17	15000	3000	15	F		F		D		B	
39	17	25000	2000	30	C		A		B		A	

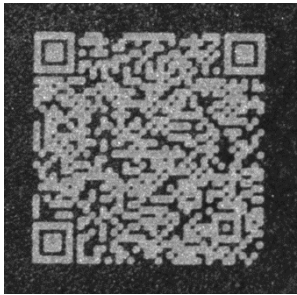
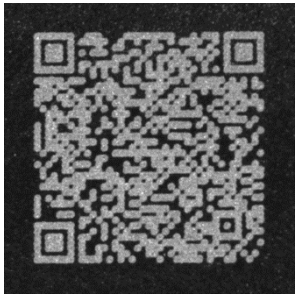
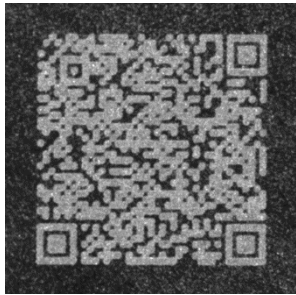
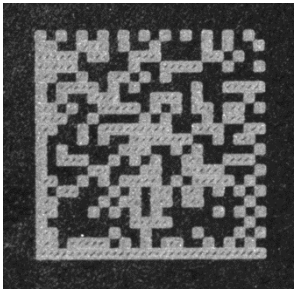
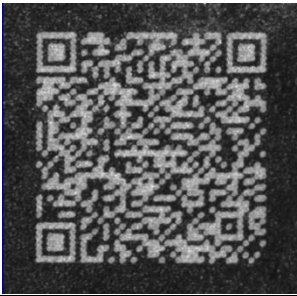

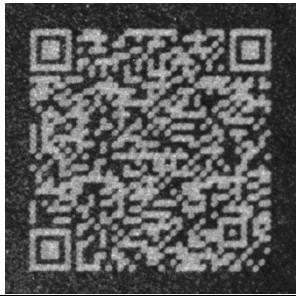
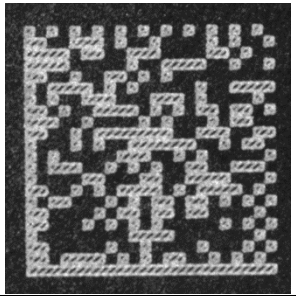
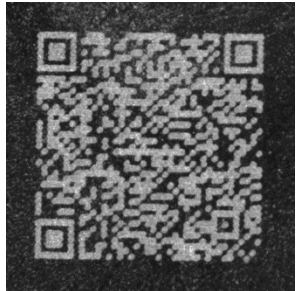
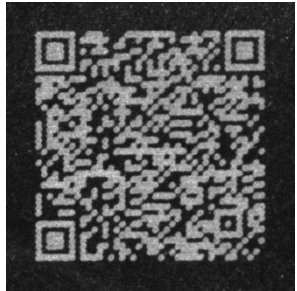
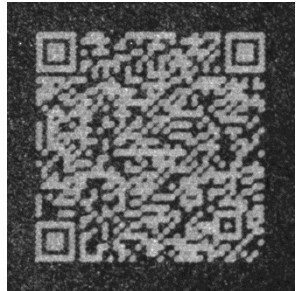
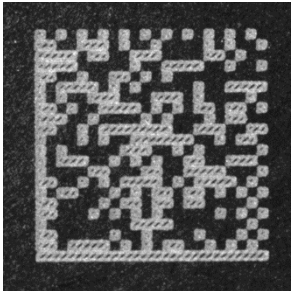
40	17	15000	2000	0	C	B	C	B
41	15	15000	2000	0	F	C	F	B
42	19	25000	1000	15	C	A	B	A

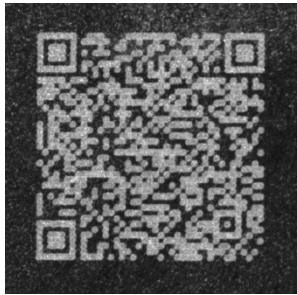
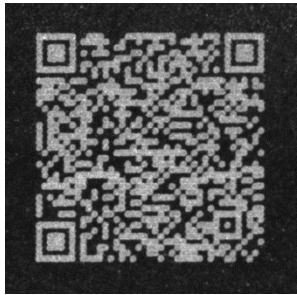
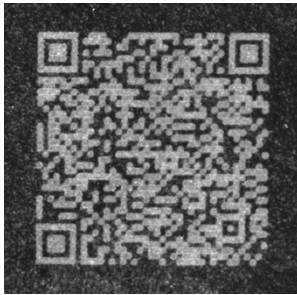
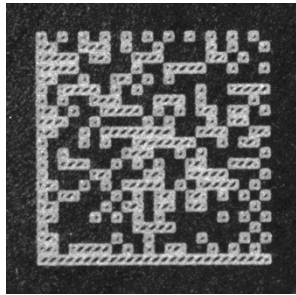
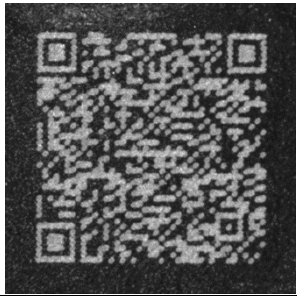
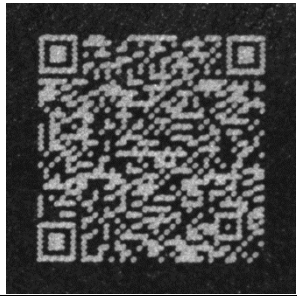
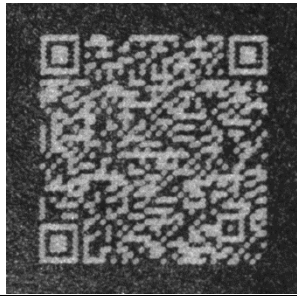
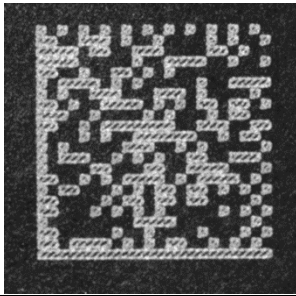
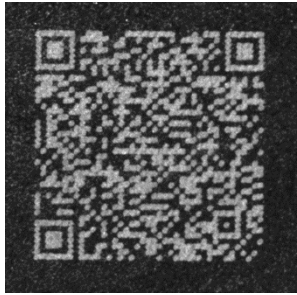
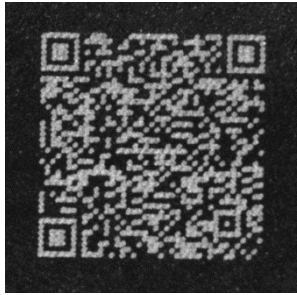
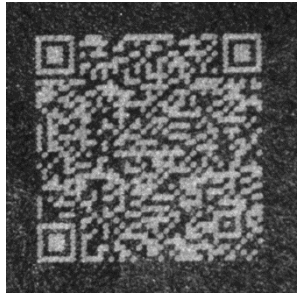
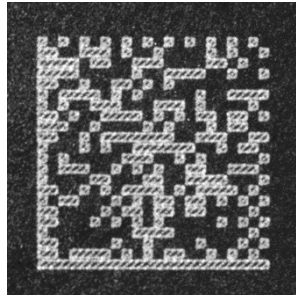
43	19	25000	1000	0	 B	 B	 C	 A
44	15	30000	2000	15	 C	 A	 B	 A
45	15	25000	1000	15	 B	 A	 C	 A

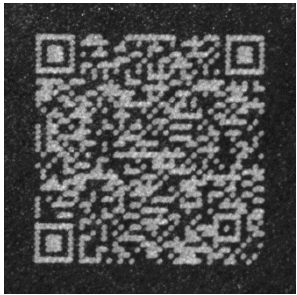
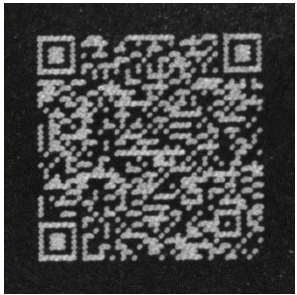
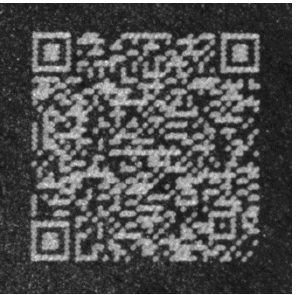
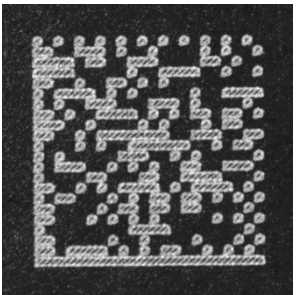
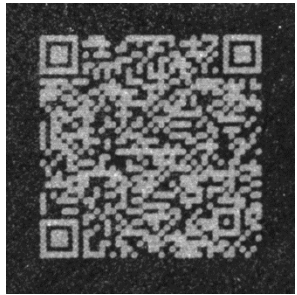
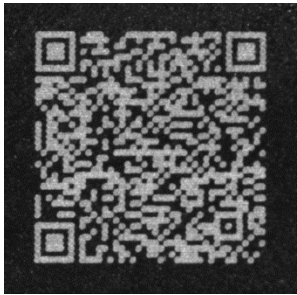
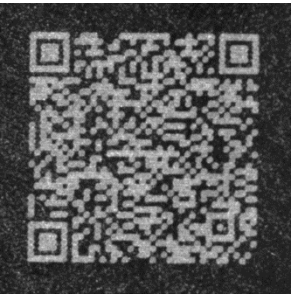
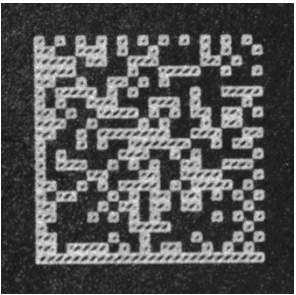
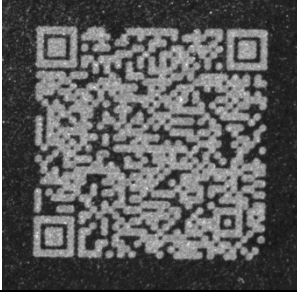
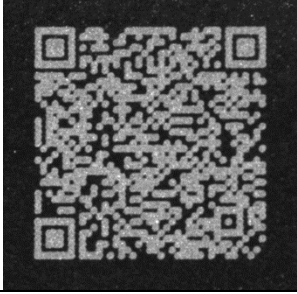
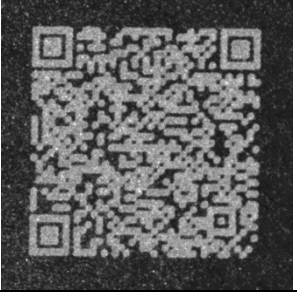
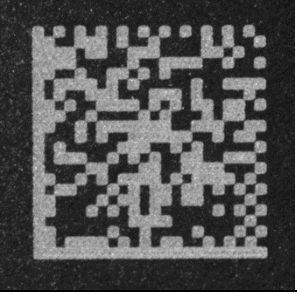
46	15	25000	2000	0	B 	A 	B 	A 
47	15	25000	2000	30	B 	A 	B 	A 
48	17	25000	1000	0	B 	A 	B 	A 

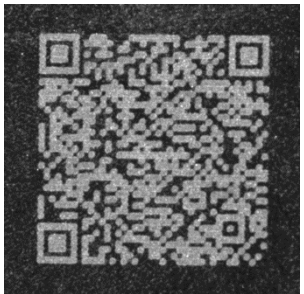
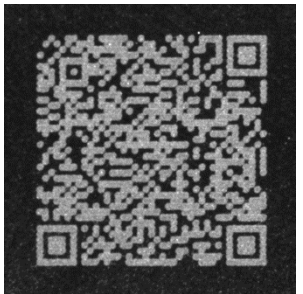
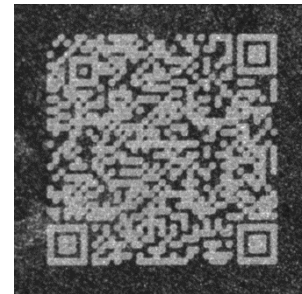
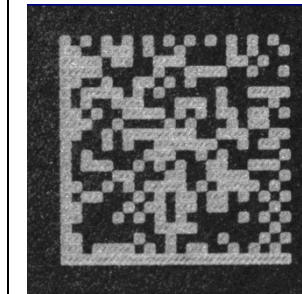
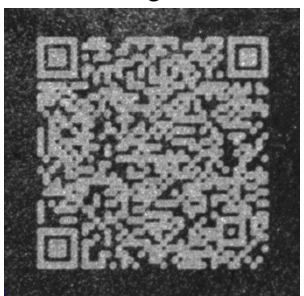
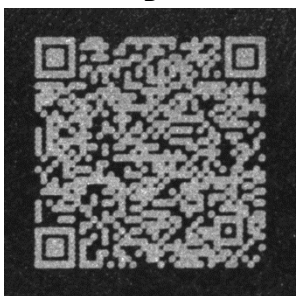
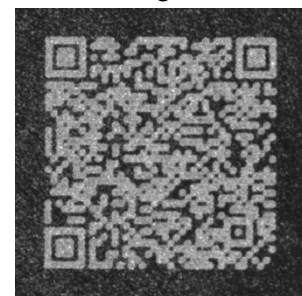
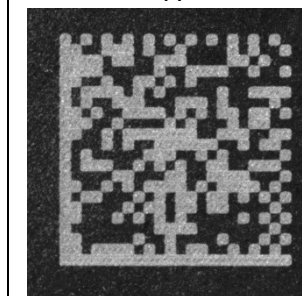
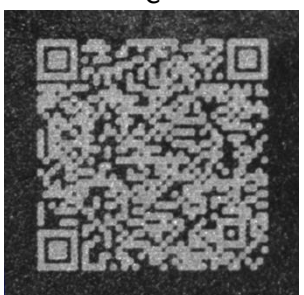
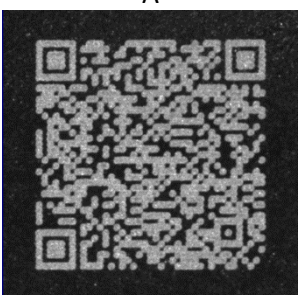
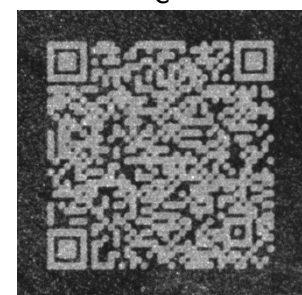
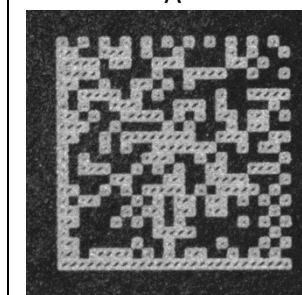
49	17	30000	2000	30	B 	A 	B 	A 
50	15	15000	1000	15	B 	A 	B 	A 
51	17	15000	3000	30	C 	B 	D 	B 

52	15	30000	1000	0	B	A	F	A
53	19	15000	3000	30	B	B	C	B
54	17	25000	1000	15	D	A	C	A

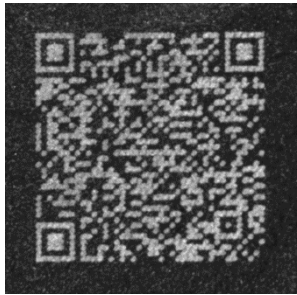
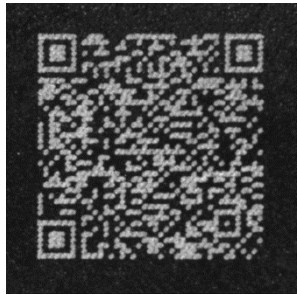
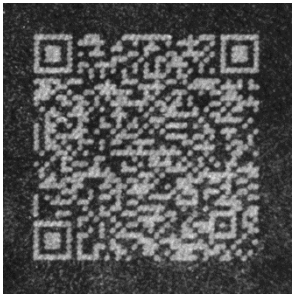
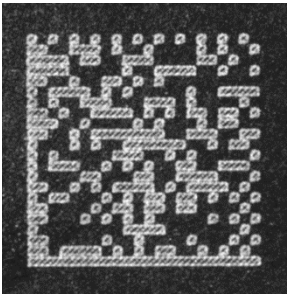
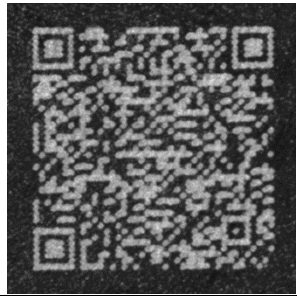
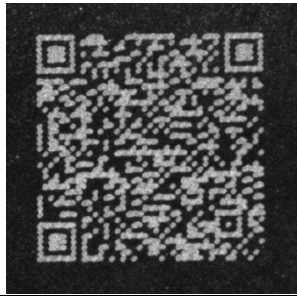
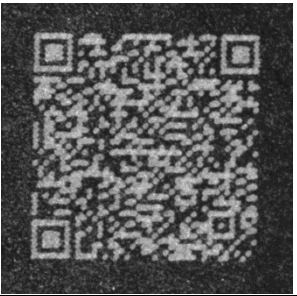
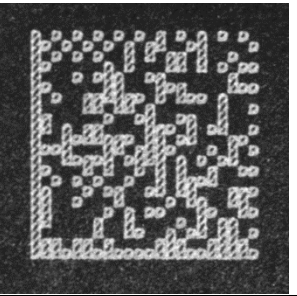
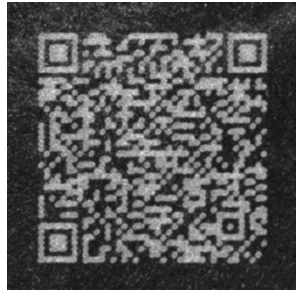
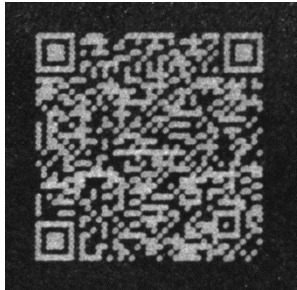
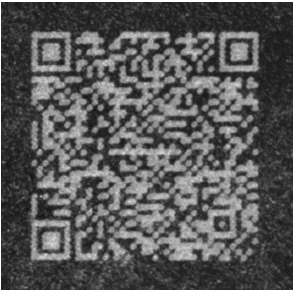
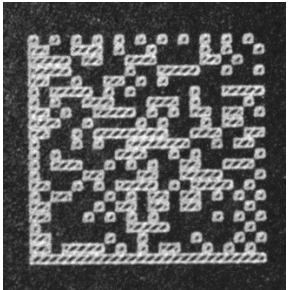
55	19	30000	1000	15	 C	 B	 D	 A
56	17	25000	2000	15	 B	 A	 B	 A
57	19	30000	2000	15	 B	 A	 B	 A

58	15	25000	1000	0				
59	19	25000	3000	15				
60	19	15000	2000	15				

61	15	30000	3000	30	B 	A 	B 	A 
62	19	15000	1000	0	B 	A 	B 	A 
63	19	30000	1000	30	C 	B 	C 	A 

64	17	25000	1000	30	 B	 A	 D	 A
65	17	30000	1000	30	 C	 B	 C	 A
66	17	30000	1000	0	 C	 A	 C	 A

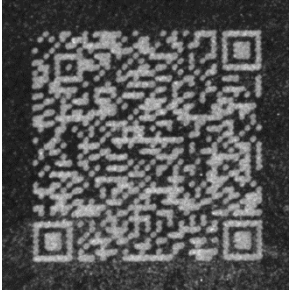
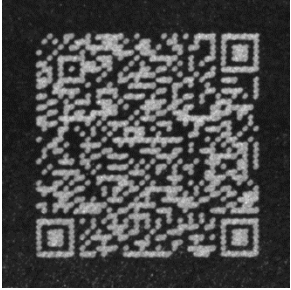
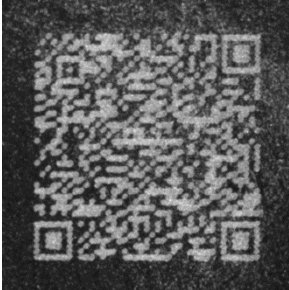
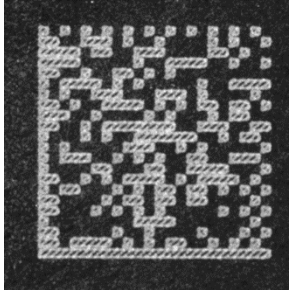
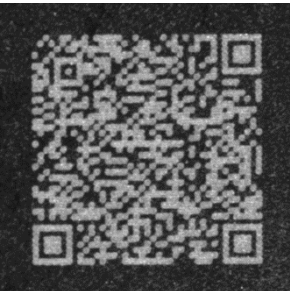
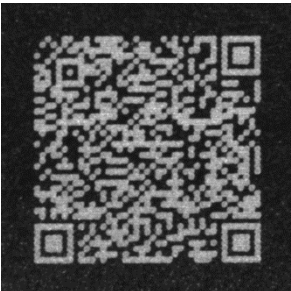
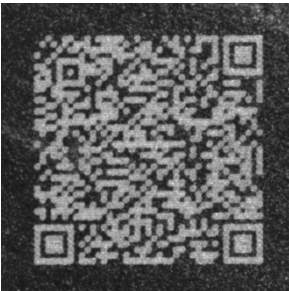
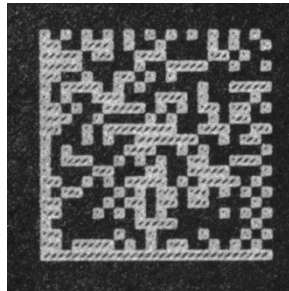
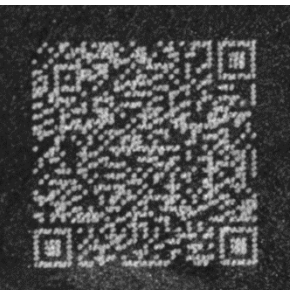
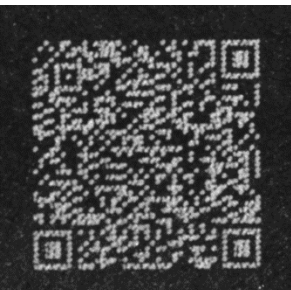
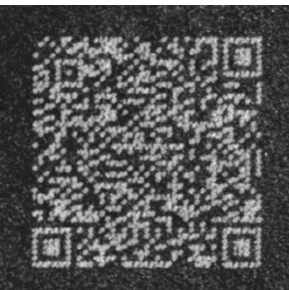
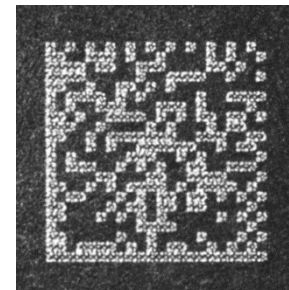
67	15	30000	1000	30	B	B	C	A
68	19	30000	2000	0	B	A	C	A
69	15	15000	2000	15	C	D	C	B

70	17	15000	2000	30	B 	A 	B 	A 
71	19	25000	3000	0	B 	A 	B 	A 
72	15	30000	2000	0	C 	A 	C 	A 

73	17	15000	1000	0	A	B	B	A
74	15	15000	3000	30	D	F	D	C
75	17	15000	2000	15	B	A	B	B

76	17	30000	3000	0	B	A	B	A
77	19	30000	2000	30	B	A	C	A
78	19	30000	3000	0	B	B	B	A

The table displays a 3x4 grid of QR code images. Each row corresponds to a specific set of parameters (ID, X, Y, Z, and a fifth parameter). The columns show different image quality or processing conditions, labeled B, A, B, and A from left to right. The QR codes in the 'B' columns appear as standard, high-contrast black and white patterns. The QR codes in the 'A' columns show varying degrees of noise, blurring, or pixelation. The QR code in the 'C' column (row 77) shows a distinct, more complex pattern, possibly representing a different encoding or a specific processing effect.

79	17	30000	3000	15	 C	 A	 D	 A
80	19	15000	1000	15	 B	 A	 D	 A
81	19	15000	3000	15	 C	 F	 D	 B