

Análise de Soluções de Materiais e Processos de Fabrico na Produção de Carimbos para a Marcação de Rolhas de Cortiça

João Nuno Costa Baptista

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Fernando Jorge Lino Alves

Co-Orientador na FEUP: Prof. Francisco José de Castro Xavier de Carvalho

Orientador na Empresa: Eng. Luís Machado



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

2021-02-05

Resumo

Análise de Soluções de Materiais e Processos de Fabrico na Produção de Carimbos para a Marcação de Rolhas de Cortiça

Dentro dos processos produtivos que uma prancha de cortiça percorre até se tornar numa rolha, pronta a inserir numa garrafa, a gravação ou marcação da rolha, é um processo de acabamento que permite transmitir mais informação ao consumidor e acrescenta um certo carácter e identidade a este produto.

O trabalho proposto pela empresa, e desenvolvido nesta dissertação, assenta na análise de materiais e processos de fabrico de carimbos e o estudo da sua implementação no contexto empresarial, tendo em vista a redução de custos e o aumento da flexibilidade produtiva neste setor.

Verificou-se importante, numa primeira fase do projeto, investigar os processos de marcação em maior detalhe para perceber as exigências que lhes estão subjacentes, verificar os processos de fabrico e materiais que lhes dão origem, bem como analisar os dados referentes às quantidades médias necessárias e os custos implícitos à sua obtenção.

De modo a averiguar as soluções de materiais, processos e equipamentos mais indicados para cada método de marcação, aplicou-se uma metodologia de seleção de materiais e processos de fabrico dos carimbos estipulados. Nesta metodologia, a partir dos requisitos do problema, da definição de índices de otimização e das condições locais, depreenderam-se duas soluções de material-processo para a marcação a fogo (a gravação a laser e a fusão seletiva a laser de aço inoxidável) e três soluções, para a marcação a tinta (a fotopolimerização aplicado à fabricação de placas flexográficas, à estereolitografia e à impressão por jato ligante).

Foram contactados fornecedores para a produção de marcas para teste, assim como uma entidade empresarial com o objetivo do desenvolvimento de um *software*, para auxiliar no processamento dos *designs* indicados para a marcação.

Com os resultados obtidos após produção e teste das marcas requisitadas, estimaram-se com base nos dados fornecidos pelas empresas, o período de recuperação do possível investimento perante as soluções encontradas.

Foi utilizada uma metodologia de decisão analítica hierárquica (AHP), para verificar as soluções mais indicadas, de entre os conjuntos analisados, para cada processo de marcação. O período de recuperação (PR), a qualidade de marcação (QM) e a flexibilidade produtiva (FP) foram os fatores de decisão definidos para o caso de estudo.

Conclui-se que, dentro das soluções de materiais, processos e equipamentos analisados, os que resultaram nos maiores valores de preferência, segundo a metodologia AHP, foram a produção híbrida de carimbos de aço inoxidável por fusão seletiva a laser, para a marcação a fogo, e a utilização de placas de acrilato de poliuretano segundo o processo produtivo de fotopolimerização de placas flexográficas, para a marcação a tinta.

Palavras-Chave: Rolhas de cortiça, Marcação de rolhas, Decisão analítica hierárquica, Gravação a laser, fusão seletiva a laser, Placas flexográficas, Estereolitografia, Impressão de jato li-gante.

Abstract

The Analysis of Materials and Manufacturing Solutions in the Production of Stamps for the Engraving Process of Cork Stoppers

There are a lot of manufacturing processes involved in the production of cork stoppers from cork boards. The process of engraving or marking of a cork stopper, is at the end of this production spectrum, and serves as a finish to either transmit additional information to the customer or simply to bring extra character and identity to the product.

The project developed in this thesis is based on the analysis of materials and manufacturing solutions in the production of cork stopper stamps and the study of the potential investment with the intention of reducing the obtaining costs of these stamps and to increase the production flexibility of the engraving sector.

The project starts out with the study of these engraving processes in better detail, to understand the underlying requirements, current materials and manufacturing processes of each one. The data referring to the average quantity and unit price of each type of stamp is also analyzed.

A material and manufacturing process selection methodology was applied and aimed at the established fire and ink type stamps. Based on their requirements, in the defining of optimization ratios and on local conditions, resulted two distinct solutions for induction marking (laser engraving and selective laser melting stainless steel) and three for ink marking (photopolymerization of flexographic plates and by means of stereolithography and material jetting).

Manufacturers were approached and asked to produce sample stamps for testing. Another company was tasked to develop an auxiliary software to bolster the stamp design process.

After the production and testing of the requested cork stamps, the estimated payback of the investment was determined based on production data provided by each manufacturer.

An analytical hierarchy process methodology (AHP) was conducted to find the most suitable material-process-machine solutions for each type of engraving process. The payback (PR), the quality of the engraving (QM) and the production flexibility (FP) were the defining decision factors of the process.

Finally, it is concluded that the hybrid production of stainless steel stamps by selective laser melting (SLM) and the manufacture of polyurethane-acrylate stamps by the process of photopolymerization of flexographic plates were the highest valued options by the AHP process.

Keywords: Cork stoppers, Cork stoppers engraving, Analytic hierarchy process, Laser engraving, Selective laser melting, flexographic plates, stereolithography, material jetting.

Agradecimentos

Ao Grupo Amorim por proporcionar a oportunidade de realizar esta dissertação num contexto empresarial e ao engenheiro Luís Machado pela supervisão do projeto. Em especial, ao grupo de estagiários e à equipa do departamento de engenharia industrial pelo companheirismo e ajuda diária nesta experiência de trabalho.

Aos professores orientadores Jorge Lino e Xavier de Carvalho pelo acompanhamento, sugestões e correções do trabalho académico elaborado e à engenheira Armanda Marques pela paciência e disponibilidade para a realização de testes no INEGI.

À cidade do Porto por todos os bons momentos e aventuras académicas desde o primeiro ao último ano, aos Zangaleões, ao Jorge Wolfs, Filipe Santos, Fernando Simões e Zé Ferreira.

Em especial ao Filipe Ferreira, Luís Russo, Guilherme Gomes e José Pedro pela motivação e amizade presente que me transmitiram na realização desta dissertação.

Ao Miguel Dias, Marta Saraiva, Filipa Martins, Pedro Brandão e Maria Pires pelos jantares, conversas, viagens e momentos cantados diários que me trazem alegria.

À minha família, especialmente aos meus pais e irmãos, por serem os meus maiores amigos, por me inspirarem a fazer mais e melhor e pelo apoio constante ao longo de todos estes anos.

Obrigado

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Corticeira Amorim	1
1.2	Amorim Cork	2
1.3	Apresentação do Projeto	3
1.4	Objetivos do Projeto	4
1.5	Metodologias Aplicadas	4
1.6	Estrutura da dissertação	5
2	Revisão de literatura	7
2.1	Cortiça	7
2.1.1	Características	8
2.1.2	Produção	8
2.1.3	Aplicações	9
2.1.4	Produção de Rolhas	9
2.2	Processos de Fabrico de Marcas (Carimbos)	10
2.2.1	Eletroerosão	11
2.2.2	Maquinagem Química	13
2.2.3	Maquinagem a Laser	13
2.2.4	Flexografia/Impressão Flexográfica	14
2.3	Fabrico Aditivo	15
2.3.1	Síntese Histórica	16
2.3.2	Estereolitografia	17
2.3.3	Impressão por Jato Ligante	18
2.3.4	Fusão em Camada de Pó	19
2.3.5	Sequência de Processos para Fabrico Aditivo	20
2.4	Seleção de Materiais	21
2.5	Metodologia de Seleção de Materiais e Processos de Fabrico Aditivo	23
2.6	Análise de Projetos de Investimento	25
2.6.1	Critérios de Decisão	27
2.6.2	Período de Recuperação	27
3	Descrição do Problema	29
3.1	Marcação de Rolhas	29
3.1.1	Marcação a Laser	30
3.1.2	Marcação a Fogo/Indução	31
3.1.3	Marcação a Tinta	35
3.2	Materiais e Processos de Fabrico de Carimbos para Marcação de Rolhas	36
3.2.1	Carimbos para Marcação a Fogo/Indução	37
3.2.2	Carimbos para Marcação a Tinta	39

3.3	Custos Associados aos Processos	41
3.4	Investimento para <i>Payback</i> em 2 anos	42
4	Trabalho Experimental	45
4.1	Pesquisa de Soluções	45
4.1.1	Requisitos dos Carimbos de Marcação	46
4.1.2	Modelação de Protótipos das Marcas	47
4.1.3	Aplicação da Metodologia de Seleção de Materiais e Processo de Fabrico	49
4.2	Soluções para Marcação a Fogo	52
4.2.1	Gravação a Laser	53
4.2.2	Fusão Seletiva a Laser	53
4.3	Soluções para Marcação a Tinta	55
4.3.1	Fotopolimerização de Placas Flexográficas	56
4.3.2	Estereolitografia	57
4.3.3	<i>Material Jetting</i>	58
4.4	Testes Realizados	59
4.4.1	Testes de Avaliação	60
4.4.2	Testes Complementares	60
4.5	<i>Software</i> Auxiliar	60
4.6	Análise de Investimento	61
4.6.1	Período de Recuperação	61
4.6.2	<i>Analytical Hierarchy Process</i> (AHP)	62
5	Resultados e Discussão	65
5.1	Processos de Fabrico e Marcação	65
5.1.1	Marcação a Fogo	66
5.1.2	Marcação a Tinta	69
5.1.3	Testes Realizados	73
5.2	<i>Software</i> Auxiliar	75
5.3	Período de Recuperação do Investimento	76
5.4	Processo de Decisão Analítica Hierárquica	77
6	Conclusão	79
6.1	Perspetivas de Trabalho Futuro	80
	Bibliografia	82
	Anexos	85
A	Esquema de Aplicações da Cortiça	87
B	Explicação e Exemplo da Metodologia de <i>Analytical Hierarchy Process</i>(AHP)	89
C	Esquema Geral da Seleção do Conjunto Material-Processo-Máquina	93
D	Desenhos Técnicos das Marcas Fabricadas	95
E	Desenhos Técnicos de Exemplos de Códigos e Marcas Topo	99
F	Gráficos Realizados para a Triagem de Materiais	103

G Matrizes de Comparação Construídas para Metodologia AHP

107

Acrónimos e Siglas

3D	Tridimensional
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CI	Custo de Investimento
CM	<i>Chemical Machining</i>
CNC	Comando Numérico Computorizado
CP	Cadência de Produção
EDM	<i>Electric Discharge Machining</i>
FA	Fabrico Aditivo
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FP	Flexibilidade Produtiva
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiaton</i>
LBM	<i>Laser Beam Machining</i>
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
MJ	<i>Material Jetting</i>
MO	Mão-de-Obra
NPP	Necessidade de Pós-Processamento
PR	Período de Recuperação
QM	Qualidade de Marcação
SLA	<i>Stereolithography</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
UV	Ultravioleta

Lista de Figuras

1.1	Vendas consolidadas por área geográfica (Corticeira Amorim, S.G.P.S., 2020).	2
1.2	Vendas consolidadas por unidade de negócios (Corticeira Amorim, S.G.P.S., 2020).	2
2.1	Exemplo de uma prancha de cortiça em corte (APCOR, 2018a).	8
2.2	Etapas correspondentes a um impulso de descarga em EDM. Adaptado de (Czelusniak et al., 2019).	12
2.3	Etapas na produção de uma placa flexográfica: (a)- fotopolímero preparado para a transferência de imagem; (b)- exposição UV inferior; (c)- remoção da camada protetora de UV; (d)- exposição UV principal; (e)- lavagem da placa; (f)- secagem da placa; (g)- pós-processamento UV. Adaptado de (Tomašegović et al., 2016).	15
2.4	Representação do processo de fabrico aditivo por estereolitografia. À esquerda: método de projeção direta. À direita: método projeção por máscara Granta Design Limited (2020).	17
2.5	Representação do processo de fabrico aditivo por impressão de jato ligante; (a)- sem o pós-processamento, (b)- com pós-processamento (Granta Design Limited, 2020).	18
2.6	Representação do processo de fabrico aditivo por <i>powder bed fusion</i> (Granta Design Limited, 2020).	19
2.7	Idealização das várias etapas na produção de uma peça por fabrico aditivo.	20
2.8	Subdivisão do domínio de materiais em família, classe, subclasse e membro para o aço inoxidável AISI 316. Adaptado de (Ashby, 2011).	22
2.9	Esquema demonstrativo da estratégia de seleção de materiais. Adaptado de (Ashby, 2011).	22
2.10	Esquema representativo da etapa de <i>translation of product requirements</i> ou tradução dos requisitos do produto. Adaptado de (uz Zaman et al., 2018).	24
2.11	Esquema representativo da etapa de <i>ranking</i> ou hierarquização. Adaptado de (uz Zaman et al., 2018).	25
2.12	Fases típicas de um projeto. Adaptado de (Lopes, 2012).	25
3.1	Os três tipos de marcação de rolhas, da esquerda para a direita: marcação a laser, marcação a fogo e marcação a tinta.	30
3.2	Equipamento utilizado para efetuar a marcação a laser (esquerda), painel de controlo digital (centro) e marcação de uma rolha (direita).	31
3.3	Exemplo de uma marca corpo com todos os seus detalhes; (1)- entalhe para inserção de códigos, (2)- furo para controlo de temperatura, (3)- cortes longitudinais para fixação no equipamento de marcação.	32
3.4	Exemplo de uma marca com código e os seus pormenores.	32

3.5	Marca corpo fixada no equipamento de marcação; (1)- elementos de fixação das marcas corpo, (2)- sonda de controlo de temperatura, (3)- resistência de aquecimento.	33
3.6	Equipamento utilizado para efetuar a marcação a fogo.	33
3.7	Exemplo de uma marca topo.	34
3.8	Marcações realizadas no topo de duas rolhas.	34
3.9	Clarificação da altura da zona de marcação e base de uma marca corpo.	34
3.10	Marca de liga de zinco antes e depois da deformação e ferramenta utilizada para curvar a marca.	35
3.11	Componentes do equipamento de marcação a tinta; (1)- depósito de tinta, (2, 3,4 e 5)- rolos de transporte de tinta, (6)- encaixe do marcador, (7)- marcador/cunho metálico	36
3.12	Imagens microscópicas de detalhes de um carimbo para marcação a fogo com uma objetiva de 1x com um zoom de 7.5x (esquerda) e 30x (direita).	37
3.13	Imagens microscópicas de detalhes de um carimbo para marcação a tinta com uma objetiva de 1x com um zoom de 7.5x (esquerda) e 20x (direita).	37
3.14	Exemplo de uma peça, em grafite, necessária ao processo de fabricação da marca (ferramenta para eletroerosão).	38
3.15	Fresadora CNC (esquerda) e máquina de eletroerosão (direita) utilizados para produção de marcas fogo.	38
3.16	<i>Designs</i> impressos em papel químico.	39
3.17	Disposição dos <i>designs</i> na superfície da chapa (esquerda) e sua introdução no equipamento fotográfico (direita).	40
3.18	Equipamento de maquinaria química.	40
3.19	Aspeto final da placa quimicamente maquinada.	41
3.20	Distribuição dos gastos da empresa na obtenção de marcas.	42
4.1	<i>Design</i> idealizado para a produção dos carimbos de marcação a fogo.	48
4.2	<i>Design</i> idealizado para a produção dos carimbos de marcação a tinta.	48
4.3	Vista de frente do carimbo idealizado para a marcação a fogo com alguns detalhes dimensionados.	48
4.4	Vista de frente do carimbo idealizado para a marcação a tinta com alguns detalhes dimensionados.	49
4.5	Gráfico que relaciona o módulo de <i>Young</i> (E) com a razão entre a condutividade térmica pelo preço por quilograma ($\frac{k}{\text{€}/\text{kg}}$) na etapa de hierarquização para a marcação a fogo (Granta Design Limited, 2020).	51
4.6	Gráfico que relaciona o módulo de <i>Young</i> (E) com a razão entre a tensão limite de elasticidade pelo modulo de <i>Young</i> e preço por quilograma ($\frac{\sigma_e}{E \cdot (\text{€}/\text{kg})}$) na etapa de hierarquização para a marcação a tinta (Granta Design Limited, 2020).	51
4.7	Gráfico da etapa de hierarquização para a marcação a tinta, restringido a materiais poliméricos (Granta Design Limited, 2020).	56
4.8	Esquema hierárquico dos fatores de comparação estabelecidas para o projeto. . .	62
5.1	Carimbos para marcação a fogo produzidos pelas várias empresas, com destaque na zona mais detalhada.	66
5.2	Imagem microscópica dos detalhes das marcas fogo com uma ampliação de 75x.	67
5.3	Rolhas carimbadas pelas marcas produzidas por cada empresa para a marcação a fogo.	68
5.4	Carimbos para marcação a tinta produzidos pelas várias empresas, com destaque na zona mais detalhada e sua aplicação no cunho de marcação.	70

5.5	Imagem microscópica dos detalhes das marcas tinta com uma ampliação de 75x.	71
5.6	Rolhas carimbadas pelas marcas produzidas por cada empresa para a marcação a tinta.	72
5.7	Teste de desgaste de marca fabricada pelo processo flexográfico com exemplares de rolhas próximas das 10000, 20000 e 50000 marcações.	73
5.8	Teste de desgaste da marca rígida fabricada por <i>material jetting</i> com exemplares de rolhas próximas das 10000, 20000 e 50000 marcações.	74
5.9	Teste de marcação em rolhas com marca retificada.	74
5.10	Teste de marcação em rolhas com altura da zona de marcação de 1.8 e 1.5[mm]. .	75
5.11	Esquema resumido do processo de modelação automática do <i>software</i> auxiliar. .	75
A.1	Esquema do ciclo de vida da cortiça e suas possíveis aplicações. Adaptado de (Corticeira Amorim, S.G.P.S., 2020).	88
B.1	Esquema hierárquico das categorias de comparação para o exemplo estabelecido.	90
C.1	Esquema geral da metodologia de seleção do conjunto material-processo-máquina para uma aplicação. Adaptado de (uz Zaman et al., 2018).	94
D.1	Desenho técnico da marca corpo teste para marcação a fogo.	96
D.2	Desenho técnico da marca teste para marcação a tinta.	97
E.1	Desenho técnico de um exemplo de código para marcação a fogo.	100
E.2	Desenho técnico de um exemplo de marca topo para marcação a fogo.	101
F.1	Gráfico que relaciona o módulo de <i>Young</i> (E) com a condutividade térmica ($\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$) na etapa de triagem para a marcação a fogo (Granta Design Limited, 2020). Aplicação do requisito: $k \geq 10[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}]$	103
F.2	Gráfico que relaciona o módulo de <i>Young</i> (E) com a temperatura de serviço máxima ($^\circ C$) na etapa de triagem para a marcação a fogo (Granta Design Limited, 2020). Aplicação do requisito: $T_{smax} \geq 700[^\circ C]$	104
F.3	Gráfico que relaciona o módulo de <i>Young</i> (E) com o módulo de <i>Young</i> (E) na etapa de triagem para a marcação a tinta (Granta Design Limited, 2020). Aplicação do requisito: $1 \geq E \geq 100[GPa]$	104
F.4	Gráfico que relaciona o módulo de <i>Young</i> (E) com a tensão limite de elasticidade (σ_e) na etapa de triagem para a marcação a tinta (Granta Design Limited, 2020). Aplicação do requisito: $\sigma_e \geq 20[MPa]$	105

Lista de Tabelas

2.1	Propriedades mecânicas e térmicas da cortiça (Granta Design Limited, 2020) . . .	8
2.2	Características físicas de peças fabricadas por estereolitografia (Granta Design Limited, 2020)	17
2.3	Fatores económicos associados ao processo de estereolitografia (Granta Design Limited, 2020)	17
2.4	Características físicas de peças fabricadas por <i>material jetting</i> (Granta Design Limited, 2020)	18
2.5	Fatores económicos associados ao processo de <i>material jetting</i> (Granta Design Limited, 2020)	18
2.6	Características físicas de peças fabricadas por <i>powder bed fusion</i> (Granta Design Limited, 2020)	20
2.7	Fatores económicos associados ao processo de <i>powder bed fusion</i> (Granta Design Limited, 2020)	20
2.8	Principais processos de fabrico aditivo e os tipo de materiais admissíveis (Alghamdy et al., 2019)	23
3.1	Dados referentes às encomendas de marcas realizadas pela empresa	42
4.1	Propriedades mecânicas e térmicas do aço inoxidável, austenítico, AISI 316 (RAMADA, 2018, 2017).	53
4.2	Características dos equipamentos de gravação a laser usados para a fabricação da marca estipulada	53
4.3	Características dos equipamentos de fusão seletiva a laser usados para a fabricação da marca estipulada	54
4.4	Propriedades mecânicas e térmicas da liga metálica de cromo-níquel <i>Inconel 716</i> (Granta Design Limited, 2020)	54
4.5	Tabela resumo das soluções de material-processo-máquina encontradas para a marcação por indução	55
4.6	Características da placa flexográfica usada para a fabricação da marca estipulada .	57
4.7	Parâmetros da produção de placas flexográficas do equipamento usado	57
4.8	Características do equipamento de fabricação de placas flexográficas usado para a fabricação da marca estipulada	57
4.9	Características do equipamento de estereolitografia usado para a fabricação da marca estipulada	58
4.10	Características mecânicas do polímero fabricado pelo processo de estereolitografia	58
4.11	Características do equipamento de <i>material jetting</i> usado para a fabricação da marca estipulada	59
4.12	Características mecânicas dos polímeros fabricados pelo processo de <i>material jetting</i>	59

4.13	Tabela resumo das soluções de material-processo-máquina encontradas para a marcação a tinta	59
4.14	Matriz de preferência entre os fatores principais de decisão do projeto	63
4.15	Matriz de preferência entre os fatores de decisão particulares para a flexibilidade produtiva (FP)	63
5.1	Dados estimados de custo e cadência de produção referentes à fabricação de carimbos, para marcação a fogo, pelas várias empresas	69
5.2	Dados estimados de custo e cadência de produção referentes à fabricação de carimbos, para marcação a tinta, pelas várias empresas	72
5.3	Dados estimados de custo e cadência de produção referentes à fabricação dos três tipos de carimbos existentes na marcação a fogo, pelas várias empresas	76
5.4	Valores estimados de <i>payback</i> do investimento nas soluções consideradas	77
5.5	Resultados finais de preferência para cada solução da marcação a fogo	77
5.6	Resultados finais de preferência para cada solução da marcação a tinta	78
B.1	Escala de juízo absoluto e sua interpretação. Adaptado de (Saaty, 2008)	89
B.2	Matriz de comparação entre os fatores referentes à aplicação exemplo	90
B.3	Matriz de comparação dos materiais (elementos de avaliação) em função da sua característica mecânica (CM)	90
B.4	Matriz de comparação dos materiais (elementos de avaliação) em função da sua característica térmica (CT)	91
B.5	Resultados finais de preferência para a aplicação exemplo	91
G.1	Matriz de comparação do fator de necessidade de pós-processamento (PP) para a marcação a fogo	107
G.2	Matriz de comparação do fator de mão-de-obra (MO) para a marcação a fogo	107
G.3	Matriz de comparação do fator de cadência de produção (CP) para a marcação a fogo	107
G.4	Resultados do fator de índice de flexibilidade produtiva (FP) para cada solução da marcação a fogo	108
G.5	Matriz de comparação do fator de período de recuperação (PR) para a marcação a fogo	108
G.6	Matriz de comparação do fator de qualidade de marcação (QM) para a marcação a fogo	108
G.7	Matriz de comparação do fator de necessidade de pós-processamento (PP) para a marcação a tinta	108
G.8	Matriz de comparação do fator de mão-de-obra (MO) para a marcação a tinta	108
G.9	Matriz de comparação do fator de cadência de produção (CP) para a marcação a tinta	109
G.10	Resultados do fator de índice de flexibilidade produtiva (FP) para cada solução da marcação a tinta	109
G.11	Matriz de comparação do fator de período de recuperação (PR) para a marcação a tinta	109
G.12	Matriz de comparação do fator de qualidade de marcação (QM) para a marcação a tinta	109

Capítulo 1

Introdução

Inserido no Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, a presente dissertação, em colaboração com a empresa Amorim Cork, pretende o desenvolvimento e implementação de novas soluções de materiais e processos de fabrico na produção de marcas para a gravação a tinta e indução em rolhas de cortiça.

Neste capítulo introdutório, pretende-se explicitar a estrutura da dissertação, apresentar a empresa e definir os objetivos e metodologia do projeto.

1.1 Corticeira Amorim

A Corticeira Amorim é um grupo empresarial que se dedica à produção de produtos associados à cortiça. Apresenta-se destacado como líder mundial neste setor e é dos maiores grupos multinacionais de origem portuguesa (Amorim, 2014). O grupo foi estabelecido em 1870 na zona do Douro, focando-se na produção de rolhas de cortiça para os produtores de vinho da região (Corticeira Amorim, 2015).

Com o seu desenvolvimento, o grupo tomou novas direções de mercado com a idealização e implementação de novas aplicações para a cortiça. Neste momento, o grupo Amorim está presente em variados setores industriais, envolvendo a cortiça tanto nos setores mais tradicionais de produção de rolhas, pavimentação, revestimentos e isolamento, bem como em soluções mais contemporâneas ligadas à produção de materiais compósitos com base em cortiça para as mais variadas indústrias (Amorim, 2014). Baseada nesta evidência, o grupo apresenta uma estrutura de gestão de negócio dividida em 5 áreas: matérias primas, rolhas, revestimentos, aglomerados compósitos e isolamentos (Corticeira Amorim, S.G.P.S., 2020).

O grupo é representado em mais de 100 países em todo o globo, possuindo mais de 80 empresas filiais e aproximadamente 30 unidades industriais que fornecem mais de 2000 clientes. A Corticeira Amorim exporta cerca de 96% de toda a sua produção (figura 1.1), maioritariamente com destino a países europeus e para os Estados Unidos da América. No ano de 2019, apresentou um volume de vendas consolidadas na ordem dos 780 milhões de euros, onde aproximadamente 70% desse valor provém da venda de mais de 5.4 mil milhões de rolhas. A distribuição de vendas

por unidade de negócio está representada no gráfico da figura 1.2 (Corticeira Amorim, S.G.P.S., 2020).

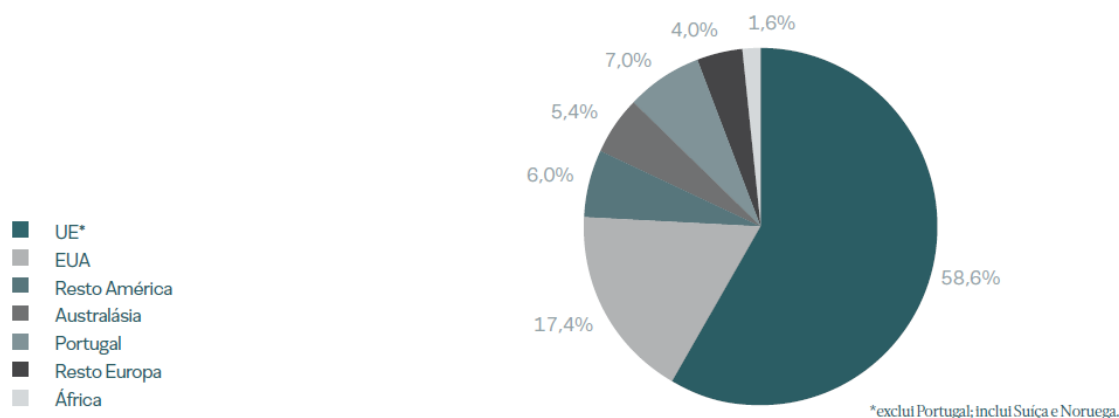


Figura 1.1: Vendas consolidadas por área geográfica (Corticeira Amorim, S.G.P.S., 2020).

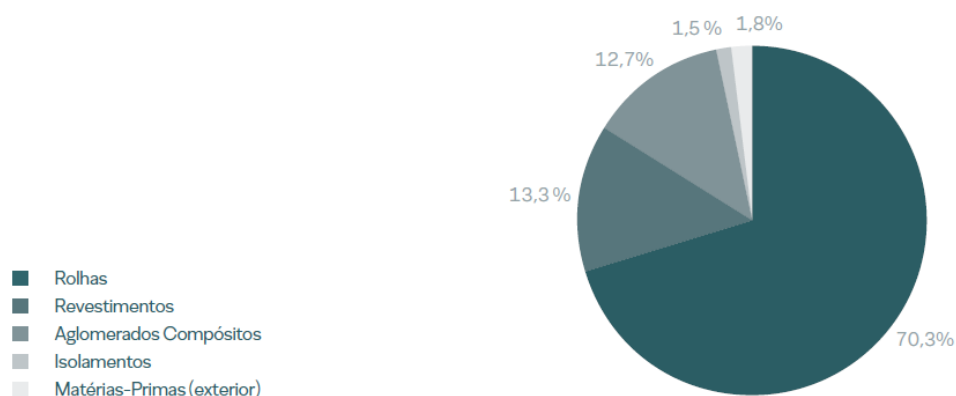


Figura 1.2: Vendas consolidadas por unidade de negócios (Corticeira Amorim, S.G.P.S., 2020).

A Corticeira Amorim promove uma economia sustentável, na medida em que a sua atividade é baseada na cortiça, uma matéria prima que é extraída sem danificar a sua fonte, o sobreiro. Com base nas particularidades desta matéria prima, no que toca à sua extração e versatilidade de aplicação, a empresa consegue atingir 100% de aproveitamento da cortiça, incorporando a realização de uma estratégia de economia circular (Corticeira Amorim, S.G.P.S., 2020).

1.2 Amorim Cork

Dentro das áreas de negócio do grupo Amorim, a Amorim Cork (entidade que proporcionou a oportunidade do projeto para a dissertação) consiste num conjunto de unidades de desenvolvimento e produção de rolhas de cortiça. As rolhas produzidas destinam-se a três segmentos de negócio particulares: vinhos tranquilos, espumosos e bebidas espirituais, onde cada um requer

uma rolha com características específicas. Estas distinguem-se em termos de tamanho, *design* e propriedades mecânicas.

A Amorim Cork é constituída por dez unidades industriais que funcionam independentemente umas das outras:

- Unidade Industrial - Lamas;
- Unidade Industrial de Sousa;
- Unidade Industrial Portocork;
- Equipar - Rolhas Natural, S.A.;
- Amorim Distribuição;
- Unidade Industrial Vasconcelos & Lyncke;
- Amorim Top Series, S.A.;
- Champcork;
- Biocape;
- ACI.

onde cada uma inclui uma ou várias etapas da produção de rolhas de cortiça. A Portocork, por exemplo, é a única unidade com tecnologia de análise individualizada de controlo de qualidade através da cromatografia, conhecida como Ndtech. A Champcork produz, marca e trata exclusivamente rolhas de champanhe, a Top Series, rolhas encapsuladas e especiais para vinhos ou bebidas espirituosas e a Biocape é uma unidade dedicada exclusivamente à produção de cápsulas.

1.3 Apresentação do Projeto

O processo de produção de uma rolha de cortiça envolve várias etapas, onde a forma, cor e textura são modificadas de acordo com a especificação do cliente. Alguns destes processos são obrigatórios pois advêm do tratamento do produto, no entanto, outros são facultativos. O processo de marcação ou gravação da rolha, faz parte deste último grupo, visto que tem como único objetivo a personalização estética do produto, diferenciando-o dos outros através da gravação de ilustrações, textos ou códigos informativos.

Este processo de gravação é atualmente realizado de três formas distintas: marcação a laser, a tinta e por indução ou fogo, cada um com as suas particularidades em termos estéticos (em função da preferência do cliente), das exigências industriais (de acordo com a cadência da marcação), e dos fatores económicos.

No contexto da empresa, o processo de gravação é relevante pois permite acrescentar mais valia ao seu produto final, no entanto, a fabricação de carimbos para a marcação a tinta e a fogo,

representa um custo considerável da operação, uma vez que implica a total dependência externa de fornecedores de marcas com uma consequente perda de flexibilidade na gestão de entrega aos clientes. Adiciona-se ainda o facto de que uma pequena mudança de design na marca de um cliente, que acontece regularmente, implica a fabricação de uma nova marca na sua totalidade.

Desta forma, a empresa pretende o desenvolvimento de um projeto que garanta a redução de custos nesta etapa final de marcação de rolhas de cortiça.

1.4 Objetivos do Projeto

O principal objetivo deste projeto consiste na análise de novas soluções de materiais e processos de fabrico de carimbos para a gravação/marcação de rolhas de cortiça e o estudo da sua implementação no contexto empresarial destacado. Em função disto, estão associados um conjunto de objetivos específicos que se pretendem cumprir:

- Reduzir custos na área da marcação;
- Aumentar a flexibilidade/agilização dos prazos de preparação e fabrico de marcas;
- Reduzir prazos de entrega de encomendas;
- Definir um projeto com *payback* inferior a 2 anos.

Como este projeto tem como finalidade o desenvolvimento de uma nova área de produção na empresa, a fabricação de marcas, é importante notar a necessidade do envolvimento de outros setores essenciais ao plano de produção. A obtenção de matéria prima, o manuseamento e preparação do design estipulado pelo cliente, a mão-de-obra necessária ao fabrico das peças e o seu pós-processamento, devem ser avaliados para concluir de forma objetiva se as metas do projeto foram alcançadas.

1.5 Metodologias Aplicadas

Para o desenvolvimento do projeto, teve-se em consideração duas metodologias de suporte: a metodologia de seleção de materiais e processos de fabrico aditivo e a metodologia de decisão por processo analítico hierárquico (AHP).

A primeira é adaptada e realizada para inaugurar o procedimento experimental, visto que objetiva encontrar as soluções de material e processo de fabrico capazes de solucionar o problema. Para isto, verificou-se necessário definir os requisitos e índices de otimização do caso de estudo.

Em contraste, a segunda metodologia é aplicada para findar o projeto. Obtidos os resultados da fabricação das peças, dos testes realizados e tendo toda a informação referente ao processo produtivo, a metodologia de decisão por processo analítico hierárquico (AHP) estabelece valores de preferência aos vários fatores, em função da sua importância para o projeto, com os quais se poderá concluir, analiticamente, qual a melhor decisão de investimento.

1.6 Estrutura da dissertação

O trabalho desenvolvido nesta dissertação apresenta-se dividido em seis capítulos. Neste capítulo introdutório, pretende-se fazer uma breve apresentação ao grupo Amorim, com especial ênfase na Amorim Cork, introduzir o projeto, o seu âmbito, os objetivos que lhe foram associados e as metodologias aplicadas.

No segundo capítulo, procura-se fundamentar a dissertação, explorando a literatura associada aos materiais, processos, metodologias e temas que irão ser alvo de discussão.

Na descrição do problema, no capítulo três, faz-se uma abordagem mais detalhada ao processo de marcação de rolhas, à obtenção dos carimbos de marcação e aos dados estatísticos que lhes estão subjacentes e que estabelecem a base do desenvolvimento do projeto.

A aplicação da metodologia de seleção, o procedimento experimental e os fatores dominantes do projeto, debatidos na decisão final, são apresentados no capítulo quatro.

No capítulo cinco, expõe-se e aborda-se os resultados obtidos. Isto compreende a fabricação dos modelos estipulados e a sua aplicação no processo de marcação. O capítulo termina com a aplicação da metodologia de decisão do qual resultam as soluções, analiticamente, mais indicadas.

Por último, no capítulo seis, retira-se as conclusões do trabalho e complementa-se com sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão de literatura

Neste capítulo vai-se fazer uma abordagem teórica aos vários conceitos, processos e metodologias aplicadas na dissertação, permitindo também contextualizar o leitor. A procura e estudo de informação relevante ao tema em questão é imprescindível para suportar as decisões tomadas, por forma a atingir os objetivos estipulados. Visto isto, os temas abordados neste capítulo podem ser resumidos da seguinte forma:

- As características, produção e aplicações da cortiça e, mais especificamente, rolhas de cortiça, sendo os principais intervenientes do processo para o qual esta dissertação foi destacada;
- Os processos de fabrico abordados no decorrer do projeto, com especial ênfase ao fabrico aditivo;
- Metodologia de seleção de materiais e processos de fabrico, visto ser o principal objetivo da dissertação;
- Análise de projetos de investimento, referente à necessidade de cumprir com os objetivos específicos estipulados.

2.1 Cortiça

A Cortiça é um material vegetal proveniente da casca do sobreiro (*Quercus Suber L.*). Este material suberoso é composto por camadas de mais de 40 milhões de células por metro cúbico. Provenientes da divisão celular (Gil, 2015b), estas células não apresentam as suas dimensões finais, pelo que passam ainda por um processo de crescimento, que origina um aumento na espessura da casca do sobreiro (Silva et al., 2005). As células da cortiça são constituídas por cinco finas camadas compostas de celulose, lenhina, suberina, taninos e ceras (Gil, 2015b). A figura 2.1 apresenta um exemplo de uma prancha de cortiça.



Figura 2.1: Exemplo de uma prancha de cortiça em corte (APCOR, 2018a).

2.1.1 Características

A cortiça é um dos materiais naturais mais versáteis (Gil, 2009), na medida em que é pouco denso e apresenta boas características de elasticidade, flexibilidade e impermeabilidade a gases e líquidos. É também um bom isolante elétrico e térmico e tem uma boa capacidade de absorção de sons e vibrações. Estas suas propriedades derivam, em parte, da sua estrutura celular alveolar (Gil, 2015b).

Na tabela 2.1 estão quantificadas algumas das propriedades da cortiça.

Tabela 2.1: Propriedades mecânicas e térmicas da cortiça (Granta Design Limited, 2020)

Propriedades do material	Cortiça
Módulo de <i>Young</i> [<i>GPa</i>]	0.025 - 0.050
Tensão de rotura [<i>MPa</i>]	0.5 - 2.5
Tensão limite de elasticidade [<i>MPa</i>]	0.3 - 2.2
Alongamento após rotura [%deformação]	20 - 80
Condutividade térmica [$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$]	0.035 - 0.048

2.1.2 Produção

Estima-se que Portugal é responsável por 52% de toda a produção de cortiça mundial, seguido por Espanha que, em conjunto, representam aproximadamente 70% da produção mundial (Brites et al., 2017). O terreno semi-árido, natural das regiões do sul da Europa e do norte de África, tem as condições perfeitas para o desenvolvimento do sobreiro. Um montado (floresta de sobreiro) previne a proliferação da desertificação, beneficia a regulação e penetração da água no solo, ajuda na captação de CO_2 atmosférico e representa o habitat de muitas espécies animais e vegetais sendo, por isso, uma mais valia no ecossistema (Gil, 2015a).

O processo de remoção da cortiça é denominado de descortiçamento. Um sobreiro destacado para a produção de cortiça, produz cerca de quatro vezes mais matéria prima que um não sujeito a este processo. A necessidade de se proteger do meio ambiente estimula a produção de uma nova camada de cortiça (Gil, 2015a).

Existe uma diferença significativa na qualidade da cortiça que é removida do primeiro, terceiro e dos descortiçamentos subsequentes. A primeira extração é realizada quando a árvore tem aproximadamente 25 anos (Corticeira Amorim, 2015) e apresenta uma estrutura, espessura e densidade irregular, denominada de cortiça virgem. Esta é normalmente usada em quadros, isolamento, juntas ou em solas para sapatos (Silva et al., 2005).

Após a primeira extração, esta operação é repetida a cada nove anos, obtendo-se uma qualidade cada vez melhor da matéria prima extraída. Só a partir do terceiro descortiçamento é que a cortiça retirada tem as condições ideais para a produção de rolhas (Corticeira Amorim, 2015).

2.1.3 Aplicações

Para além das aplicações clássicas da cortiça em rolhas, revestimentos e isolamentos, este material é utilizado com outras finalidades inovadoras e promissoras. Estas aplicações exploram as propriedades mecânicas, económicas e ambientais desta matéria prima, associando-a frequentemente a outros materiais de forma a complementarem-se (Gil, 2015b). A cortiça recolhida de um sobreiro é classificada preliminarmente como amadia ou falca. A primeira, corresponde à que provém do tronco do sobreiro, e a segunda, dos despojos da poda do mesmo (Gil, 2018). Assente neste princípio, a Corticeira Amorim, S.G.P.S. (2020) esquematiza o ciclo de vida desta matéria prima, mostrando as suas várias áreas de aplicação e utilidades, apresentadas na figura A.1 do anexo A.

2.1.4 Produção de Rolhas

A produção de rolhas de cortiça é um processo antigo e que tem sofrido muitas alterações ao longo dos anos. Todo o processo de produção é iniciado com o descortiçamento e obtenção das pranchas de cortiça. Na produção de rolhas, só é usada cortiça do terceiro ou subsequente descortiçamento.

As etapas particulares à produção de rolhas a partir de uma prancha de cortiça são dependentes do tipo de rolha que se pretende produzir. Este produto é dividido em 3 grupos: as rolhas naturais, fabricadas diretamente a partir de uma prancha, as rolhas técnicas, formadas por aglomerados de cortiça, e o conjunto de “outras rolhas”, que representam qualquer outra variante existente (APCOR, 2018c).

O percurso industrial começa com a cozedura das pranchas de cortiça classificada como amadia. Esta etapa tem como principal objetivo a limpeza e regularização do tamanho das pranchas. É utilizada água limpa a ferver que coze a cortiça durante aproximadamente 1 hora, tornando-a mais macia, elástica e aumentando o volume da prancha em aproximadamente 20%. Em seguida, efetua-se a estabilização da cortiça, que consiste em conceder às pranchas duas ou três semanas de

repouso. Isto promove a sua nivelção e um teor de humidade ideal para a escolha e rabaneção (APCOR, 2018b).

A seleção das pranchas é feita manualmente e são classificadas tendo em consideração a sua espessura, porosidade e aspeto. Posteriormente, as pranchas são cortadas transversalmente em traços, com uma largura ligeiramente superior ao comprimento das rolhas a fabricar. O corte ou brocagem, compreende a perfuração manual, semi-automática ou automática destas tiras, por forma a obter cilindros de cortiça. É a partir destes cilindros que vão ser produzidas as rolhas naturais. Todos os desperdícios do processo de brocagem são aproveitados e reduzidos a pequenos fragmentos (granulados), que constituirão as rolhas técnicas ou outros produtos de cortiça aglomerada (APCOR, 2018b).

Na fase seguinte, os cilindros são retificados e topejados para garantir as dimensões especificadas e regularizar as superfícies. Estas rolhas são posteriormente verificadas e separadas em classes diferenciadas por vias de equipamento automatizado. Estas máquinas aferem, primeiramente, a capacidade de vedação da rolha. De seguida, verifica-se a existência e intensidade de defeitos e poros (lenticelas) na cortiça, permitindo a classificação das rolhas nas várias classes diferenciadas: Flor especial, Flor, Extra, Superior, 1º, 2º e 3º, em ordem decrescente de qualidade.

Segue-se a lavagem e desinfeção das rolhas, usualmente pela utilização de água oxigenada ou ácido paracético. Isto permite estabilizar o teor de humidade e reduz a possibilidade de contaminação microbiológica. Consoante as especificações do cliente, existe também a possibilidade das rolhas naturais passarem por um processo de colmatção. Esta operação, consiste na obturação das falhas e poros presentes na superfície da rolha, com uma mistura de pó de cortiça e cola, feita à base de resina natural ou água. As rolhas colmatadas têm um aspeto visual distinto, que pode ser preferido por alguns clientes, e uma *performance* melhorada (APCOR, 2018b).

Existem dois tipos de acabamentos, realizados posteriormente. A marcação das rolhas com o design estipulado pelo cliente (procedimento facultativo) e o tratamento da superfície das rolhas com parafina ou silicone, para facilitar a sua introdução e extração da garrafa. O processo produtivo termina com o embalamento e transporte das rolhas para o cliente (APCOR, 2018b).

2.2 Processos de Fabrico de Marcas (Carimbos)

No processo de desenvolvimento de produto, os processos de fabrico que lhe estão subjacentes constituem uma grande parte da sua identidade. A escolha deste fator é, em conjunto com o material, o principal limitador das características do objeto que se pretende fabricar. A massa, geometria, espessura da secção, rugosidade e tolerância são propriedades que variam mediante o processo escolhido.

Nesta secção, vão ser analisados os processos de fabrico abordados para a produção de carimbos usados na marcação de rolhas de cortiça.

2.2.1 Eletroerosão

A eletroerosão, em inglês *Electric discharge machining* (EDM), é um processo de maquinagem não convencional, desenvolvido no final da década de 1940, que emprega energia termoelétrica na remoção de matéria por meio de descargas elétricas, entre a ferramenta (ânodo) e a peça de trabalho (cátodo), envolvidos por um meio dielétrico. Como não existe contacto direto entre a ferramenta e o objeto, as características mecânicas do material a ser maquinado são desprezadas e não têm influência no desgaste da ferramenta (Dhakar et al., 2020).

A teoria que suporta a remoção de matéria por eletroerosão segundo Czelusniak et al. (2019), está associada ao efeito erosivo criado na sucessão das descargas elétricas entre dois materiais condutores. Segundo esta teoria, convencionam-se 4 passos sucessivos que descrevem o processo de erosão:

1. Ignição;
2. Formação do canal de plasma;
3. Fusão e evaporação do cátodo;
4. Expulsão do material fundido.

A figura 2.2 representa cada uma destas etapas, resumidamente, em termos da variação da tensão (U) e corrente (i) no processo de maquinagem e dos parâmetros do processo. Estes últimos representam a voltagem de ignição u_i , a voltagem média u_e , o tempo de atraso da ignição t_d , a duração da descarga t_e , o intervalo e duração de impulsos (t_0 e t_i) e a extensão de tempo de um ciclo de descarga t_p .

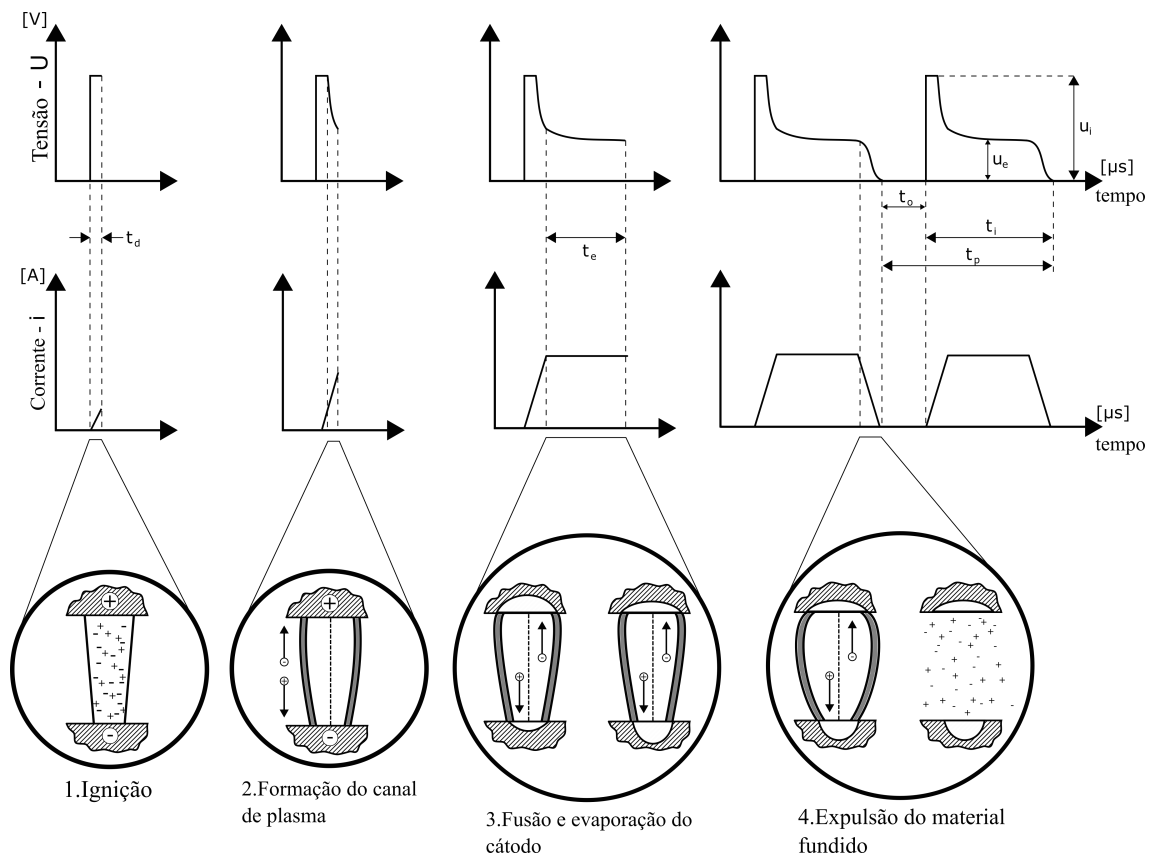


Figura 2.2: Etapas correspondentes a um impulso de descarga em EDM. Adaptado de (Czelusniak et al., 2019).

Numa fase inicial, o cátodo (-) e o ânodo (+) estão a uma distância considerável, separados por um fluido dielétrico. É aplicada tensão ao sistema mas devido à resistência do dielétrico, só existe geração de corrente com o avanço da ferramenta em direção à peça de trabalho. A ignição consiste na primeira emissão de elétrons do cátodo em direção à peça que, ao atingir as moléculas do fluido dielétrico, intensifica a libertação de elétrons e iões positivos, viabilizando a ionização do ânodo e cátodo, respetivamente. A contínua formação e movimentação de elétrons provoca o aquecimento e vaporização do dielétrico que, conseqüentemente, diminui a sua resistência que aumenta a passagem de corrente elétrica. Neste momento, forma-se um fluxo de plasma entre os elétrodos em que a descarga elétrica é concentrada num determinado volume (Czelusniak et al., 2019).

Com a extensão do período de descarga, o fluxo energético do plasma promove a fusão de ambos os elétrodos, através de condução térmica, mas com reduzida vaporização. A fusão na ferramenta é mais acentuada do que na peça de trabalho devido à menor quantidade de elétrons a interagirem com o ânodo comparativamente ao cátodo. Existe, no entanto, uma re-solidificação da ferramenta em consequência do aumento do raio do plasma na superfície do ânodo, reduzindo a transferência de calor no mesmo (Czelusniak et al., 2019).

No fim do período de descarga dá-se uma interrupção abrupta da corrente elétrica. O canal de plasma colapsa numa bolha de vapor que provoca a dispersão do material fundido na superfície

dos elétrodos para o fluído dielétrico. Uma parte deste material re-solidifica nas crateras e nas suas proximidades, formando uma camada denominada de camada branca com propriedades distintas das do material base (Czelusniak et al., 2019; Handa et al., 2020).

2.2.2 Maquinagem Química

A maquinagem química, *chemical machining* (CM) em inglês, é um método de fabrico não convencional que consiste na remoção de material a partir da introdução da peça num meio corrosivo que remove quimicamente as áreas seleccionadas da peça original. Este processo é usado na produção de objetos ou gravações, a partir de placas planas e de reduzida espessura, como uma chapa metálica (Çakır, 2019).

Estabelece-se 3 componentes necessários para o processo de maquinagem química: o material base, o foto-protetor e a solução corrosiva. Segundo Çakır (2019), o processo inicia-se com a limpeza da superfície do material base, usualmente uma chapa metálica, seguido da aplicação do foto-protetor (*photo-tool*) sobre a superfície da placa. Esta camada é removida manualmente ou via impulsos de radiação UV, por um processo fotográfico, nas regiões onde se pretende a remoção de material. A placa é inserida num banho de solução corrosiva, que corrói as zonas desprotegidas pelo foto-protetor até a geometria desejada (Çakır, 2019). A concentração, temperatura e tempo de exposição à solução corrosiva são parâmetros importantes neste tipo de maquinagem (Ibrahim and Mustafa, 2019). É importante notar que a temperatura da solução influencia a rugosidade da superfície negativamente, e a taxa de remoção, positivamente, sendo por isso, essencial a sua manipulação particular para cada trabalho (Çakır, 2019).

O parâmetro que mais influencia a maquinagem química é a escolha do ácido. Para a maioria dos materiais é utilizado uma solução aquosa de cloreto de ferro (III) ($FeCl_3$), no entanto, para otimizar os resultados, a seleção deste parâmetro deve ser feita em função do material que se pretende maquinar (Çakır, 2019).

Algumas vantagens deste processo são explicitadas por Patil and Chanmanwar (2018): a inexistência de tensões geradas pela maquinagem, muito comum nos processos convencionais, o custo reduzido e versatilidade da camada foto-protetora, a diversidade de materiais válidos e a capacidade de produzir peças sem a alteração das propriedades termo-mecânicas do material.

2.2.3 Maquinagem a Laser

Dentro dos processos não tradicionais de maquinagem, a maquinagem a laser, ou *laser beam machining* (LBM) compreende a remoção de material mediante um feixe laser que funde, vaporiza e ataca quimicamente a superfície numa área reduzida do objeto (Parandoush and Hossain, 2014). O laser (LASER: *Laser Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) consiste num feixe de radiação eletromagnética que, ao ser direcionado sobre a superfície de trabalho, promove a transferência de energia térmica ao material, modifica o seu estado físico e viabiliza a sua remoção (Namdev et al., 2018).

A versatilidade do processo LBM, permite-o ser análogo a diversas máquinas ferramentas tradicionais. As configurações mais comuns são como máquina de corte, furadora, fresadora, torno e máquina de gravação. A velocidade de avanço [mm/s], frequência [kHz] e potência do laser [W] são os principais parâmetros deste tipo de equipamento (Namdev et al., 2018; Sureban et al., 2019).

As particularidades associadas à utilização de um feixe laser como ferramenta de corte são adequadas para a maquinagem de materiais frágeis, duros e para a produção de peças com elevada complexidade e detalhes. Em virtude de ser um processo térmico, neste tipo de maquinagem, propriedades como a condutividade e difusividade térmica da peça têm uma grande influência na remoção de matéria, enquanto que as características mecânicas podem ser desprezadas (Parandoush and Hossain, 2014).

Dentro das configurações possíveis da maquinagem a laser, a gravação tem algumas particularidades que são importantes de referenciar. O princípio básico da gravação a laser consiste na emissão de impulsos em vez de um feixe. Estes impulsos geram uma grande quantidade de energia, que se concentra na área a maquinar da peça que provoca a vaporização do material. Os parâmetros de velocidade de avanço, potência e frequência dos impulsos emitidos, permitem alterar a quantidade de energia transferida à peça de trabalho e, conseqüentemente, controlar o processo (Nikolidakis et al., 2018).

A remoção de matéria, traduz-se na transferência de energia térmica ao material, aumentando a sua temperatura, até ao ponto de transição de fase sólida para vapor, denominada ablação. Com a remoção de várias camadas é possível a produção de superfícies tridimensionais com elevada precisão (Nikolidakis et al., 2018).

2.2.4 Flexografia/Impressão Flexográfica

A flexografia é uma técnica de impressão de imagem, frequentemente usada na indústria, papelaria e eletrônica. O processo compreende uma conjugação funcional entre a tinta, a placa flexográfica e o impresso, por intermédio da ação de rolos rotativos (Olmos et al., 2019; Poljaček et al., 2014).

As placas flexográficas utilizadas, denominadas de placas de impressão ou *printing plates*, permitem a transferência de tinta para o impresso e são geralmente constituídas de fotopolímeros elastoméricos (mais de 70% da sua composição), acrilatos de baixa densidade molecular, plastificantes, foto-iniciadores, estabilizadores e corantes (Tomašegović et al., 2016). A impressão é possível devido às diferenças geométricas na placa, isto é, o relevo entre a área que se pretende transferir ao impresso e o resto da placa. A flexibilidade deste material permite-lhe ser aplicável numa variedade de produtos como em papel, cartão, filmes poliméricos e metais (Olmos et al., 2019).

Na produção destas placas, o material fotossensível é exposto à luz ultravioleta, para a obtenção das características funcionais necessárias ao processo flexográfico. Este mecanismo, denominado de fotopolimerização, consiste na solidificação de materiais poliméricos fotossensíveis, sujeitando-os à luz UV (Hennessy et al., 2015).

O material base é subdividido em 3 camadas: uma camada base ou substrato, o material fotopolimérico e uma camada foto-protetora (Poljaček et al., 2014; Tomašegović et al., 2016).

O processo produtivo de placas flexográficas segundo Tomašegović et al. (2016) é subdividido em seis etapas, representadas na figura 2.3: a exposição do substrato à luz ultravioleta (b) (fotopolimerização da base), a remoção da camada protetora em função do *design* a imprimir (c) e nova exposição à radiação UV (d) (dando forma à geometria pretendida). Com a lavagem (e), secagem (f) e pós-processamento (g), há a remoção do excesso de material e o tratamento da placa por forma a obter as características necessárias à impressão (Poljaček et al., 2014; Tomašegović et al., 2016).

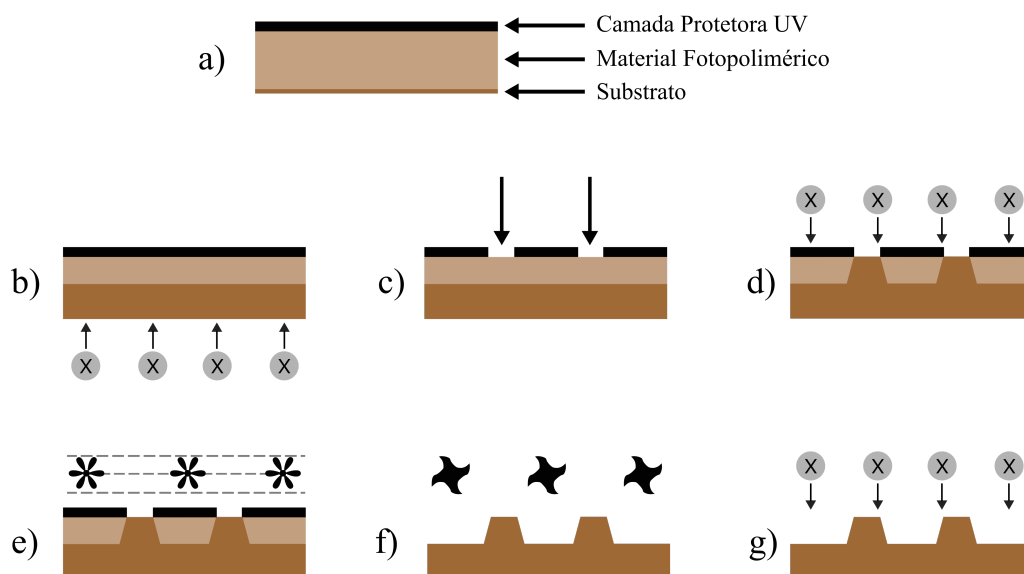


Figura 2.3: Etapas na produção de uma placa flexográfica: (a)- fotopolímero preparado para a transferência de imagem; (b)- exposição UV inferior; (c)- remoção da camada protetora de UV; (d)- exposição UV principal; (e)- lavagem da placa; (f)- secagem da placa; (g)- pós-processamento UV. Adaptado de (Tomašegović et al., 2016).

2.3 Fabrico Aditivo

Segundo Duda and Raghavan (2016) o fabrico aditivo (FA) ou *additive manufacturing* (AM) (Família ISO/ASTM, 52900:2013), também conhecido como impressão 3D (tridimensional), é uma técnica de fabrico que consiste na produção de estruturas simples ou complexas, camada a camada, com base num modelo tridimensional, contrariamente aos métodos tradicionais de remoção de matéria.

Existem diversas maneiras de classificar os vários processos de fabrico aditivo. Estas abordagens são normalmente baseadas na tecnologia usada, ou seja, extrusão de material, lasers, impressão ou no tipo de matéria prima que é fornecida. Isto resulta, por vezes, no agrupamento

de técnicas que aparentam não ter quaisquer semelhanças, o que pode provocar alguma confusão (Rashid, 2019). Com base na classificação estabelecida na norma ASTM F2792 - 12a estes processos são divididos em 7 categorias (Família ISO/ASTM, 52900:2013):

1. *VAT Photopolymerization*;
2. *Material Jetting*;
3. *Binder Jetting*;
4. *Material Extrusion*;
5. *Powder Bed Fusion*;
6. *Sheet Lamination*;
7. *Direct Energy Deposition*

onde cada uma destas técnicas tem a sua particularidade no que toca à forma inicial da matéria prima, estando esta sob a forma de filamento, pó, resina ou chapa (Ngo et al., 2018).

2.3.1 Síntese Histórica

As primeiras patentes registadas sobre tecnologias de fabrico aditivo, foram desenvolvidas na década de 1980, onde Charles Hull, no ano de 1984, cria um processo que consiste no endurecimento de polímeros líquidos através de luz ultravioleta, designado de estereolitografia (Savini and Savini, 2015). No fim desta década, o conceito de manufatura de objetos laminados (LOM), a sinterização seletiva a laser (SLS) e a fabricação por deposição de filamentos fundidos (FDM) são concebidos. O primeiro resume-se na ligação de várias camadas seccionadas de um laminado, o segundo, tem como base a fusão de partículas em pó, mediante um feixe laser, e a tecnologia FDM consiste na fusão, deposição e consequente arrefecimento de polímeros termoplásticos, provenientes de um filamento (Savini and Savini, 2015).

O conceito de “Impressão 3D” surge no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), no início dos anos 90, com o desenvolvimento e produção deste tipo de tecnologia, inspirado na impressão a tinta 2D. Estas técnicas de produção, nessa altura, eram essencialmente empregues por empresas na elaboração de protótipos. Nos anos seguintes, são realizadas iniciativas com o intuito de expansão do fabrico aditivo para um ambiente doméstico (Savini and Savini, 2015).

Com o término das primeiras patentes relativas à impressão 3D, na segunda década do século XXI, esta tecnologia tem um crescimento significativo. A introdução de novos materiais poliméricos e a viabilidade de fabrico de peças metálicas e cerâmicas são desenvolvidos, simultaneamente, com a evolução e inovação dos processos de fabrico aditivo (Savini and Savini, 2015).

2.3.2 Estereolitografia

O processo *VAT Photopolymerization*, também conhecido como estereolitografia (SLA), consiste, essencialmente, na fotopolimerização de resinas poliméricas. Isto traduz-se na utilização de luz UV para iniciar uma reação em cadeia numa camada de resina ou solução de monómeros fotossensíveis que, conseqüentemente, formam uma cadeia polimérica que solidifica. Posteriormente, para consolidar a integridade estrutural da peça, o objeto necessita de pós-processamento sob a forma de uma cura por ação de radiação UV (Ngo et al., 2018).

Este método de fabrico aditivo tem duas configurações possíveis, que diferem na técnica de solidificação da resina. A mais comum, ou projeção direta, consiste na solidificação pontual, camada a camada, através da passagem de um feixe laser nas zonas pretendidas. Por outro lado, a projeção por máscara traduz-se no endurecimento de toda uma área, por camada, com a utilização de uma “máscara” virtual, que bloqueia parte da radiação incidente (Rashid, 2019). A figura 2.4 retrata, de um modo simplificado, estas duas vertentes.

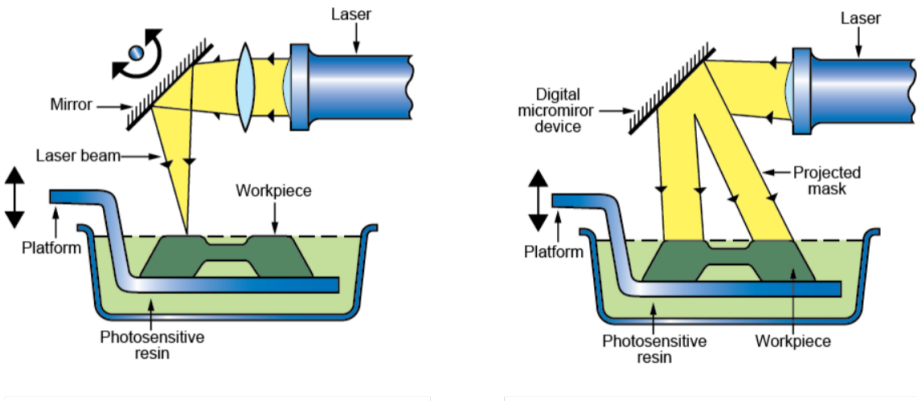


Figura 2.4: Representação do processo de fabrico aditivo por estereolitografia. À esquerda: método de projeção direta. À direita: método projeção por máscara Granta Design Limited (2020).

Em geral, a estereolitografia tem a capacidade de produzir peças com boas tolerâncias, mas acaba por ser um processo lento, limitante na variedade de materiais e dependente de pós-processamento (Ngo et al., 2018). As tabelas 2.2 e 2.3 resumem algumas características das peças fabricadas e fatores económicos do processo de SLA, respetivamente.

Tabela 2.2: Características físicas de peças fabricadas por estereolitografia (Granta Design Limited, 2020)

Características físicas	Valores
Massa do objeto [kg]	0.1 - 10
Espessura de secção [mm]	0.5 - 100
Espessura da camada [μm]	25 - 150
Tolerância [mm]	0.1 - 2.0
Rugosidade da superfície [μm]	100 - 125

Tabela 2.3: Fatores económicos associados ao processo de estereolitografia (Granta Design Limited, 2020)

Fatores económicos	Valores
Tamanho do lote [Unid]	1 - 10
Mão-de-obra	Elevada
Rácio de utilização de material	0.5 - 0.7
Taxa de produção [Unid/hr]	0.04 - 12
Tempo de vida da ferramenta [Unid]	1e ⁵ - 1e ⁶

2.3.3 Impressão por Jato Ligante

No processo de impressão por jato ligante ou *material jetting* (MJ) é utilizado um único ou um conjunto de bocais móveis que depositam partículas líquidas de matéria numa superfície, camada a camada. Este procedimento é complementado por um processo de cura (sinterização ou fotopolimerização), que acompanha a ferramenta e simultaneamente consolida o material depositado, idêntico à representação da figura 2.5. Esta tecnologia permite a fabricação de modelos com vários materiais e admite a sua mistura em diferentes rácios, possibilitando estabelecer precisamente as propriedades da peça final (Yang et al., 2017).

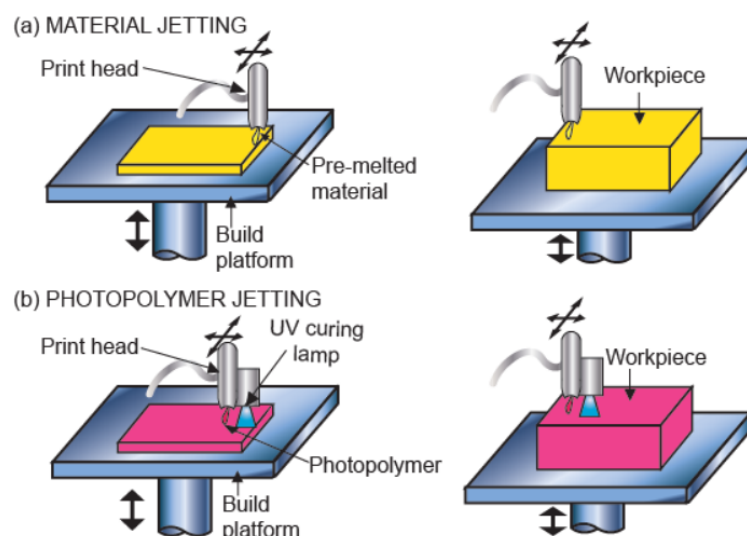


Figura 2.5: Representação do processo de fabrico aditivo por impressão de jato ligante; (a)- sem o pós-processamento, (b)- com pós-processamento (Granta Design Limited, 2020).

Yang et al. (2017) mencionam a frequente utilização deste método na fabricação de protótipos devido à sua elevada taxa de produção, flexibilidade e viabilidade de materiais. As características físicas da fabricação mediante este método estão apresentadas na tabela 2.4 e os fatores económicos na tabela 2.5.

Tabela 2.4: Características físicas de peças fabricadas por *material jetting* (Granta Design Limited, 2020)

Características físicas	Valores
Massa do objeto [kg]	0.1 - 10
Espessura de secção [mm]	1.2 - 100
Espessura da camada [μm]	16 - 76
Tolerância [mm]	0.3 - 2.0
Rugosidade da superfície [μm]	75 - 100

Tabela 2.5: Fatores económicos associados ao processo de *material jetting* (Granta Design Limited, 2020)

Fatores económicos	Valores
Tamanho do lote [Unid]	1 - 10
Mão-de-obra	Média
Rácio de utilização de material	0.9 - 0.98
Taxa de produção [Unid/hr]	1 - 5
Tempo de vida da ferramenta [Unid]	$1e^5 - 1e^6$

2.3.4 Fusão em Camada de Pó

O conceito de *Powder Bed Fusion* pode, essencialmente, ser dividido em duas tecnologias: a sinterização seletiva por laser, ou *selective laser syntering* (SLS) e a fusão seletiva por laser, ou *selective laser melting* (SLM). Ambas consistem na projeção de um feixe laser, ou de eletrões, que percorre, pontualmente, as áreas definidas pelas secções do modelo a ser produzido. Isto ocorre sobre uma camada de material em pó assente na plataforma de produção, tal como representado na figura 2.6. Após cada passagem, a plataforma desce e uma nova camada de material em pó é depositado por um rolo ou lâmina (Yang et al., 2017).

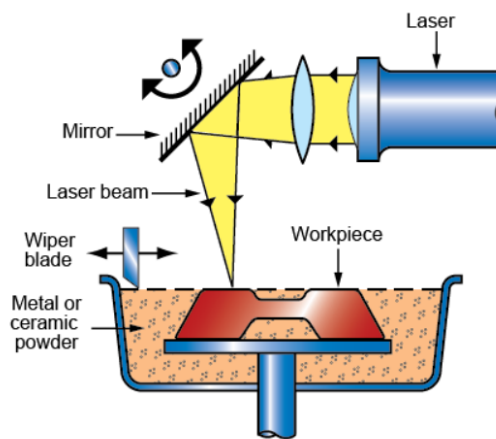


Figura 2.6: Representação do processo de fabrico aditivo por *powder bed fusion* (Granta Design Limited, 2020).

Enquanto que a variante de SLS envolve a fusão das partículas do material a nível atómico, o processo SLM compreende a fusão total do pó. Esta diferença permite, ao primeiro, ter uma maior rapidez e flexibilidade de produção, mas produzir peças mais porosas e com características mecânicas inferiores, em comparação com o segundo. A maior desvantagem está associada ao controlo do processo, ou seja, existem muitas variáveis que põem em causa as propriedades do modelo a ser produzido e que precisam de estar otimizadas (Rashid, 2019). O tamanho, distribuição e compactação do pó, as condições ambientais inertes necessárias à impressão e a necessidade de pós processamento para algumas peças são alguns destes fatores (Adeyemi et al., 2018; Ngo et al., 2018).

As características das peças produzidas segundo estes processos estão apresentadas na tabela 2.6 e os aspetos económicos que lhes estão associados, na tabela 2.7.

Tabela 2.6: Características físicas de peças fabricadas por *powder bed fusion* (Granta Design Limited, 2020)

Características físicas	Valores
Massa do objeto [kg]	0.1 - 20
Espessura de secção [mm]	0.8 - 100
Espessura da camada [μm]	20 - 100
Tolerância [mm]	0.2 - 0.8
Rugosidade da superfície [μm]	8 - 125

Tabela 2.7: Fatores económicos associados ao processo de *powder bed fusion* (Granta Design Limited, 2020)

Fatores económicos	Valores
Tamanho do lote [Unid]	1 - 10
Mão-de-obra	Elevada
Rácio de utilização de material	0.5 - 0.85
Taxa de produção [Unid/hr]	0.04 - 1.6
Tempo de vida da ferramenta [Unid]	$1e^5$ - $1e^6$

2.3.5 Sequência de Processos para Fabrico Aditivo

O processo de fabrico aditivo consiste, fundamentalmente, na fabricação de um objeto, a partir da sua representação virtual, por técnicas de adição de matéria. Rashid (2019) delimita 8 etapas na sequência deste procedimento: ficheiro CAD (*Computer-Aided Design* (Família ISO/ASTM, 52900:2013)) do objeto a fabricar, conversão para .*stl* (que origina do termo estereolitografia (Família ISO/ASTM, 52900:2013)), transferência e manipulação do ficheiro na máquina, *setup* da máquina, fabricação do modelo, remoção, pós-processamento e tratamentos adicionais, resumidos na figura 2.7.

Este procedimento, para além de ser fundamental, permite customizar as características da peça final, isto é, a quantidade de material, resolução e possíveis apoios necessários na impressão, os quais afetam o tempo de fabricação.

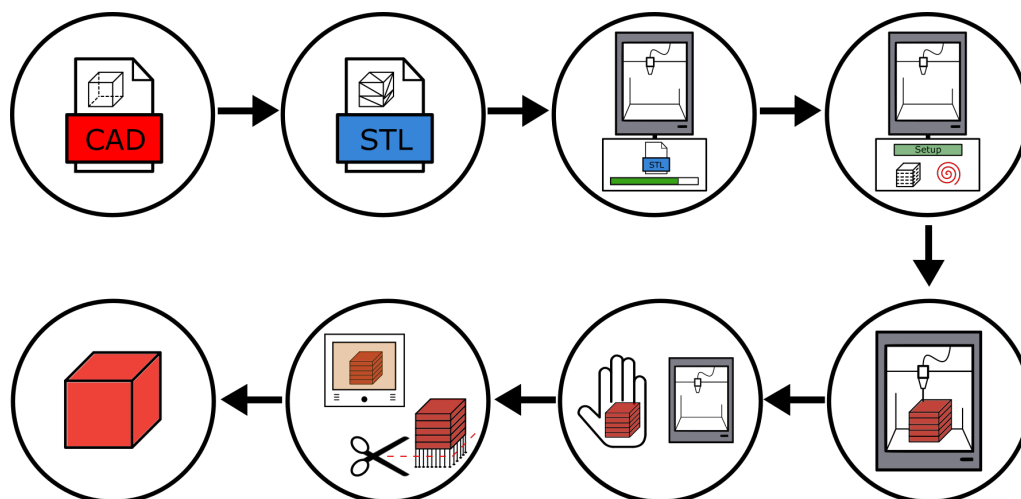


Figura 2.7: Idealização das várias etapas na produção de uma peça por fabrico aditivo.

O primeiro passo consiste no desenvolvimento do objeto em formato digital, que compreende a modelação da peça num software CAD. Em seguida, é necessário a transformação do ficheiro

para um formato compatível com a máquina de FA, frequentemente do tipo *.stl*, que realizam a segmentação do modelo em partes executáveis pela máquina impressora (Marbun et al., 2020).

A terceira etapa especifica a transferência e manipulação do ficheiro para a máquina de FA, através de um software específico, de modo a que a peça esteja bem posicionada, orientada e corretamente dimensionada para o procedimento. Posteriormente, é realizado o *setup* da máquina que permite estabelecer parâmetros de construção como o material que vai ser usado, espessura de cada camada, fonte de energia, geração de suportes, entre outros (Rashid, 2019).

O quinto e sexto passos consistem na fabricação e remoção da peça, respetivamente. O primeiro, é realizado automaticamente sendo necessário uma pequena supervisão de controlo do processo. A remoção, apesar de exigir normalmente a intervenção humana, pode ser automatizada (Rashid, 2019).

Em alguns processos de fabrico aditivo, como na estereolitografia ou *binder jetting*, é necessário o pós-processamento da peça para que esteja 100% funcional, correspondente à sétima etapa. A limpeza de pós, remoção de estruturas de suporte, curas e tratamentos térmicos são alguns exemplos destes procedimentos. Por último, apesar da peça estar pronta, ainda podem ser realizados acabamentos superficiais ou pinturas para que esta fique completamente finalizada (Rashid, 2019).

2.4 Seleção de Materiais

No desenvolvimento de qualquer produto, é imperativo a seleção de um material. Com isto, entende-se a necessidade de estabelecer uma ligação entre a função a ser desenvolvida e o material, de modo a otimizar esta relação. Isto é realizado com base nas necessidades do *design* específico e nas propriedades intrínsecas de cada material.

No que diz respeito ao domínio dos materiais, este pode ser subdividido em famílias, classes, subclasses e membros, em que cada um especifica mais o anterior, como se pode verificar na figura 2.8, que retrata esta subdivisão para o aço inoxidável AISI 316. O perfil de propriedades de cada membro particular, é caracterizado pelas suas propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e químicas, o seu custo, pegada ecológica, etc. (Ashby, 2011).

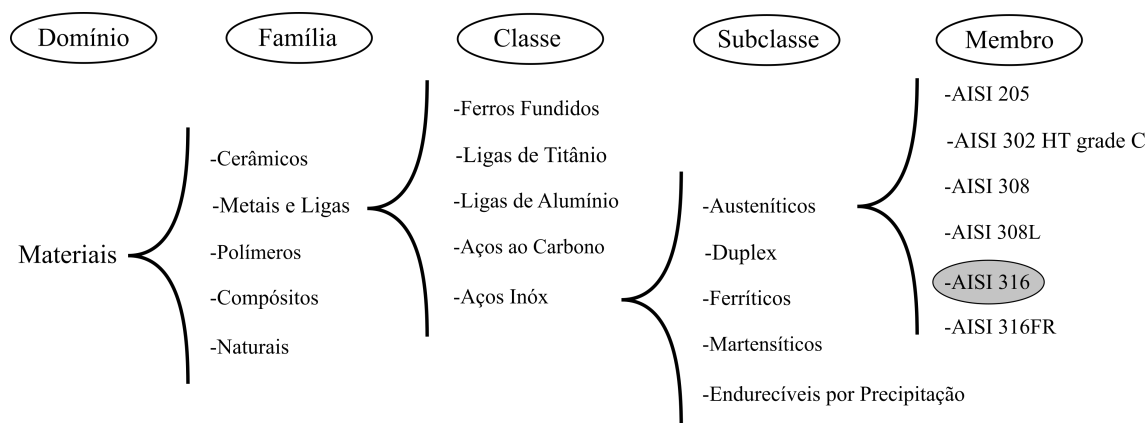


Figura 2.8: Subdivisão do domínio de materiais em família, classe, subclasse e membro para o aço inoxidável AISI 316. Adaptado de (Ashby, 2011).

Para a escolha de um material, Ashby (2011) concebeu uma estratégia resumida pela figura 2.9. Esta estratégia baseia-se em três etapas: a *screening and ranking* ou a triagem e hierarquização, a *supporting information* e *local conditions*, que se traduzem em informação de suporte e condições locais, respetivamente.

Percorrendo o processo de seleção da metodologia segundo Ashby (2011), considera-se que, inicialmente, todos os materiais são potenciais candidatos até serem eliminados pelas próximas etapas da metodologia. Na triagem, são rejeitados os que não possuem propriedades necessárias ao projeto, ou seja, requisitos mecânicos, térmicos, químicos ou qualquer outro sem o qual é impossível o desenvolvimento do produto. É preciso, seguidamente, ordenar os materiais que passaram a fase de triagem num processo de hierarquização. Esta fase implica a aplicação de critérios de otimização, ou seja, a determinação de índices específicos/índices de mérito para cada material que otimizam o *design*, com o intuito de se estabelecer uma comparação. Estes índices, variam para cada aplicação e são, na sua forma mais simples, representados por uma fração, onde no numerador é contemplada a propriedade que se pretende maximizar e no denominador, pelo contrário, a que se deseja minimizar. Alguns exemplos destes índices podem ser a rigidez específica e a resistência à flexão específica, $\frac{E}{\rho}$ e $\frac{\sigma_E}{\rho}$, respetivamente (Ashby, 2011).

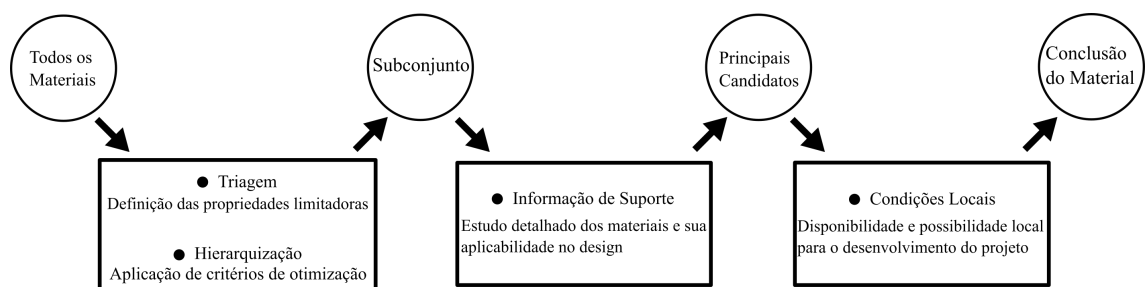


Figura 2.9: Esquema demonstrativo da estratégia de seleção de materiais. Adaptado de (Ashby, 2011).

De seguida, ao pequeno grupo de materiais que satisfazem as condições impostas pela primeira

etapa desta metodologia, realiza-se uma pesquisa detalhada de forma a validar os requisitos mais minuciosos do *design*. A isto, Ashby (2011) chama de *supporting information* ou informação de suporte, que difere da informação usada na etapa anterior na sua especificidade. Estudos, artigos e catálogos de fornecedores, são alguns exemplos de onde se pode procurar este tipo de informação.

As condições locais são a última etapa no que toca à seleção de materiais. Pretende-se verificar a disponibilidade, possibilidade e custo de obtenção destes materiais relativamente à existência de fornecedores e equipamento necessário para o desenvolvimento do processo. É uma etapa que depende, na sua maioria, do conhecimento local (Ashby, 2011).

2.5 Metodologia de Seleção de Materiais e Processos de Fabrico Aditivo

A variabilidade e distinção entre os processos de fabrico aditivo, possibilita diversas combinações de material-processo. Na secção anterior, analisou-se uma metodologia para a escolha de um material para uma determinada função. No entanto, devido a esta variabilidade de processos e às restrições, considerações e requisitos inerentes de cada um, verifica-se uma necessidade de conciliar tanto os fatores relativos ao material como dos processos de fabrico aditivo, de modo a otimizar a seleção do conjunto material-processo-máquina.

Com base nas 7 categorias de fabrico aditivo estipuladas na secção 2.3, Alghamdy et al. (2019) associam a cada uma, as famílias ou classes de materiais possíveis de fabricar. Esta relação encontra-se resumida na tabela 2.8.

Tabela 2.8: Principais processos de fabrico aditivo e os tipo de materiais admissíveis (Alghamdy et al., 2019)

Categoria do Processo de Fabrico Aditivo	Família ou Classe de Material Válido
<i>VAT Photopolymerization</i>	Polímeros fotossensíveis
<i>Material Jetting</i>	Cerâmicos, Polímeros fotossensíveis
<i>Binder Jetting</i>	Metais, Polímeros, Cerâmicos
<i>Material Extrusion</i>	Polímeros
<i>Powder Bed Fusion</i>	Metais, Polímeros
<i>Sheet Lamination</i>	Metais, Polímeros
<i>Direct Energy Deposition</i>	Metais

Similarmente à metodologia de escolha que é empregue na secção anterior para o domínio dos materiais, a escolha do conjunto material-processo-máquina no que toca ao fabrico aditivo é realizada segundo um conjunto de etapas. uz Zaman et al. (2018) definem três etapas principais: *translation of requirements* ou a tradução dos requisitos, a triagem e a hierarquização, idênticas em funcionamento às delineadas na secção anterior. A figura C.1 do anexo C esquematiza, em síntese, todo este processo.

Relativamente à tradução dos requisitos, o intuito é retirar especificações funcionais do modelo CAD (objetivo, restrições e geometria da peça) de modo a identificar os requisitos do *design*, do material e do processo de fabrico aditivo ou de qualquer uma das combinações destes três fatores, sem esquecer a viabilidade das *guidelines* do processo de fabrico aditivo. Nesta etapa, pressupõe-se que o próprio produto ainda está numa fase inicial e que, portanto, existe ainda flexibilidade na alteração do *design* se não se verificar uma concordância entre os requisitos gerados e as especificações funcionais do mesmo (uz Zaman et al., 2018). A figura 2.10 esquematiza o procedimento descrito.

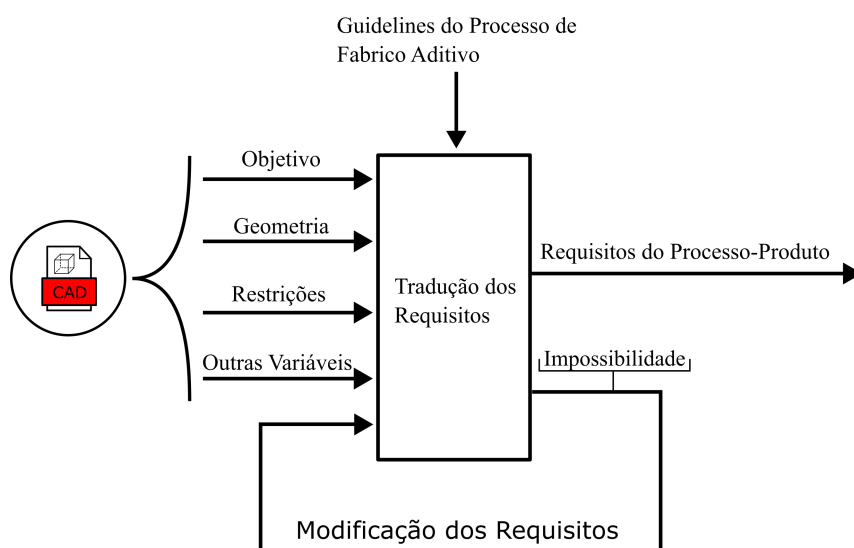


Figura 2.10: Esquema representativo da etapa de *translation of product requirements* ou tradução dos requisitos do produto. Adaptado de (uz Zaman et al., 2018).

A segunda e terceira etapas, triagem e hierarquização, são análogas em termos de funcionamento às exploradas anteriormente. No entanto, neste caso, é também necessário desenvolver esta lógica aos processos de fabrico aditivo. A velocidade de fabrico, espessura mínima de camada e o volume e custo de produção são algumas características que podem condicionar a escolha de uma máquina de fabrico aditivo (uz Zaman et al., 2018).

Para complementar o processo de hierarquização, uz Zaman et al. (2018) e Alghamdy et al. (2019) recorrem a um algoritmo baseado na metodologia de decisão analítica hierárquica, ou *Analytical Hierarchy Process* (AHP), que permite classificar os materiais e processos de fabrico aditivo tendo em conta o seu desempenho aos critérios/requisitos definidos. Esta metodologia é descrita com mais detalhe no Anexo B.

A etapa final de hierarquização, esquematizada na figura 2.11, termina o processo de escolha na medida em que resulta num conjunto de materiais com as características necessárias ao projeto e associados aos processos/máquinas de fabrico aditivo mais adequados que, sendo aceite, dá seguimento para a produção (uz Zaman et al., 2018).

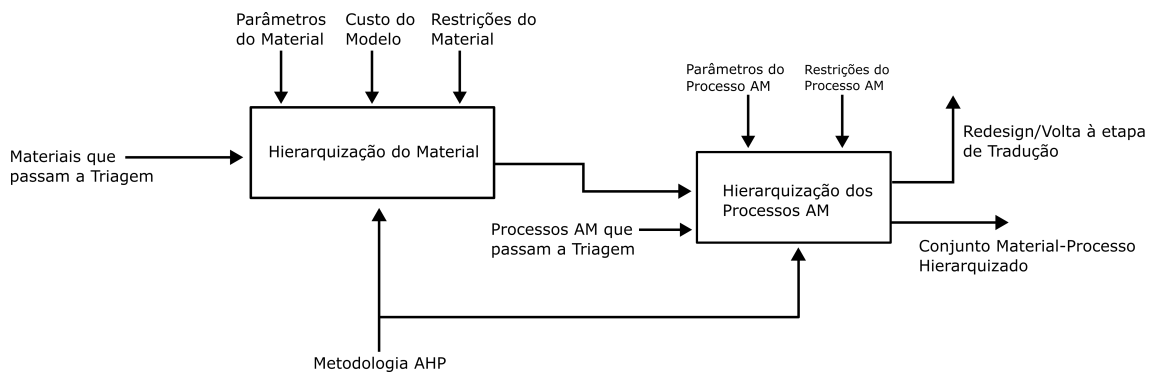


Figura 2.11: Esquema representativo da etapa de *ranking* ou hierarquização. Adaptado de (uz Zaman et al., 2018).

2.6 Análise de Projetos de Investimento

Antes de um projeto ser iniciado, verifica-se uma necessidade de estudar a sua viabilidade financeira. Este tópico é abordado pela análise de projetos de investimento onde se pretende identificar novas oportunidades de investimento a longo prazo, não correntes, e avaliar o seu resultado no plano empresarial (Lopes, 2012).

Segundo Lopes (2012) um projeto passa por um conjunto de etapas onde a sua análise é apenas uma delas. Este faseamento tem como objetivo melhorar o controlo de gestão do projeto ao estabelecer pontos de paragem, definir o conteúdo e estipular prazos de trabalho em cada uma das etapas, impedindo que o projeto avance descontroladamente. Existem vários e distintos modelos de faseamento, dependendo do tipo e dimensão do projeto. O modelo apresentado na figura 2.12, contempla quatro etapas que são comuns à maioria dos projetos e uma revisão final que visa determinar se os objetivos iniciais do projeto foram alcançados e qual o seu impacto na empresa.

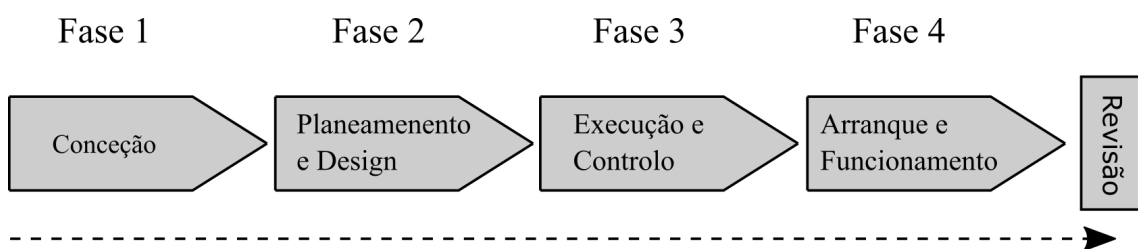


Figura 2.12: Fases típicas de um projeto. Adaptado de (Lopes, 2012).

A fase de conceção consiste na identificação do projeto, isto é, verificar a sua viabilidade, assinalar e estudar os eventuais riscos da sua implementação e aferir possíveis alternativas. Na fase de planeamento e *design* são realizados estudos de engenharia e *design* mais detalhados e é elaborado um plano discriminado do investimento. É ainda neste passo que os restantes riscos devem ser identificados, estabelecem-se contratos e desenvolvem-se protótipos. Em seguida, a execução traduz-se na concretização dos planos definidos anteriormente. Esta fase deve estar sob controlo de modo a manter dentro do previsto as estimativas realizadas. Por último, no arranque e

funcionamento os testes finais são realizados e o projeto entra em funcionamento regular (Lopes, 2012).

É possível também incluir no tema de análise de um projeto de investimento, outras questões que devem ser analisadas por forma a confirmar a viabilidade do projeto. Lopes (2012) identifica as seguintes áreas a ser abordadas:

- Análise do *background* do projeto;
- Análise estratégica;
- Análise de recursos e de viabilidade técnica;
- Análise de mercado;
- Análise de viabilidade económica e financeira;
- Enquadramento legal;
- Análise organizacional e financeira;
- Análise social;
- Análise ambiental;
- Análise política;
- Aspectos específicos do projeto.

O estudo individual e conjunto destes tópicos permite identificar os fatores de risco do projeto e a forma de os mitigar. Dependendo do tipo de projeto, associa-se uma maior importância a determinados tópicos em relação aos outros. No caso da presente dissertação, a análise do *background*, de recursos e viabilidade técnica, mercado e a análise de viabilidade económica e financeira foram as que se refletiram como sendo de maior interesse.

O primeiro ou o *background* do projeto, trata de clarificar o objetivo, o que se pretende fazer com o projeto e delimitar as suas fronteiras de maneira a perceber-se o mais cedo possível quais as áreas abrangidas por forma a que todo o trabalho realizado seja útil. As alternativas para a resolução do problema também surgem desta análise pelo que devem ser estudadas em termos de viabilidade para seguirem, ou não, em frente na análise (Lopes, 2012).

A análise de recursos e de viabilidade técnica visa procurar as necessidades inerentes à aplicação das várias alternativas estabelecidas. As questões associadas aos processos de fabrico e tecnologias a utilizar, as especificações e recursos necessários à obtenção dos equipamentos e a sua possibilidade em produzir o *output* pretendido são questões mais técnicas. Adicionalmente, devem ser realizadas estimativas de custo e as margens pretendidas, bem como um planeamento do calendário de execução do projeto (Lopes, 2012).

Na análise de mercado, pretende-se fazer uma avaliação do projeto em termos da sua viabilidade financeira. Este facto assenta no estudo de dois tópicos: a análise do produto e a análise do mercado. A decisão do investimento está baseada nestes fatores, pelo que quanto mais precisos e corretos forem, maior é a confiança que se tem no investimento. O estudo do produto diz respeito à análise dos elementos que influenciam a sua procura no mercado. Esta informação é referente às necessidades de consumo às quais se pretende responder e a existência de outros produtos com

a mesma função. A análise de mercado engloba o estudo dos fatores que condicionam a procura e as vendas, como a sua situação atual, concorrência, preços, características dos consumidores e políticas de distribuição. É também importante analisar a capacidade de obter quota de mercado suficiente para justificar o investimento (Lopes, 2012).

A necessidade de obtenção de financiamento, implica uma análise económica e financeira para certificar que o projeto cria valor na empresa, sem pôr em causa o equilíbrio financeiro da mesma. Este estudo assenta num plano de investimentos, plano de exploração e plano de financiamento. O primeiro tem a função de explicitar, identificar e calendarizar os investimentos necessários ao projeto e assenta essencialmente nos estudos técnicos feitos anteriormente. O plano de exploração apresenta a informação relativa a gastos e rendimentos do projeto e, finalmente, o plano de financiamento explicita a cobertura financeira do projeto ao longo da sua vida e pretende antever as necessidades de financiamento por forma a minimizar o custo de capital (Lopes, 2012).

2.6.1 Critérios de Decisão

Na avaliação e seleção de projetos em contexto empresarial, verifica-se a prática de critérios de decisão, baseados no confronto entre os *cash-flows* investidos no projeto com os *cash-flows* gerados pelas operações (Lopes, 2012). Esta análise está intimamente ligada ao estudo de viabilidade económica e financeira do plano de investimento.

Segundo Lopes (2012), pode-se distinguir dois critérios elementares no âmbito de avaliação de projetos de investimento. São os denominados de critérios contabilísticos, que ignoram o custo do capital, e os critérios baseados na atualização dos fluxos, ou seja, que têm em conta o valor temporal do dinheiro.

Nos primeiros, procura-se verificar a rentabilidade do capital investido nos projetos, por analogia aos indicadores de rentabilidade económica e financeira da empresa, tais como a ROI (*return on investment*), que relaciona os resultados operacionais com o capital investido, e a ROE (*return on equity*), que relaciona os resultados líquidos com o capital próprio. Os critérios de decisão com atualização assentam numa revisão periódica dos *cash-flows* inerentes ao projeto tal como no VAL (valor atual líquido), na TIR (taxa interna de rentabilidade), no PRA (período de recuperação atualizado) e no IR (índice de rentabilidade). Lopes (2012) indica que os critérios contabilísticos não devem ser utilizados no contexto de avaliação de projetos de investimento, mas como indicadores de rentabilidade económica e financeira de uma empresa, na sua generalidade. Por outro lado, os baseados na atualização de fluxos são os mais coerentes com a teoria financeira e adequados a propostas de investimento.

2.6.2 Período de Recuperação

Dentro dos critérios contabilísticos, Lopes (2012) identifica um método de medição do tempo necessário para que os *cash-flows* gerados pelo projeto cubram os *cash-flows* nele investidos, ao qual se dá o nome de período de recuperação. Caso este valor calculado exceda o limite máximo estipulado, o projeto é rejeitado. O limite é fixado tendo em conta o tipo de investimento sendo

que, normalmente, em setores de rápida evolução tecnológica são definidos períodos mais curtos que para setores mais estáveis. Desta forma, o período de recuperação (PR) pode ser determinado segundo a equação seguinte:

$$PR = Nr_{Anos} + \frac{CI_f}{cf_f} \quad (2.1)$$

onde Nr_{Anos} corresponde ao número de anos antes da recuperação completa do custo de investimento, CI_f é a última parte do custo de investimento a recuperar e cf_f o *cash-flow* do ano em que a recuperação completa ocorre. Desta forma, se forem considerados invariáveis os *cash-flows* gerados ao longo dos anos, pode-se reescrever a equação unicamente em função do custo total do investimento (CI) e do *cash-flow*, constante, gerado anualmente (cf_A) da seguinte forma:

$$PR = \frac{CI}{cf_A} \quad (2.2)$$

Este método, apesar de não ser o mais indicado para averiguar a viabilidade de um plano de investimento, por não ter em conta o valor temporal do dinheiro e ignorar os *cash-flows* após o período de recuperação, apresenta-se como um bom indicador de liquidez e risco de um projeto.

Capítulo 3

Descrição do Problema

Neste capítulo, dá-se a conhecer ao leitor os pormenores específicos do projeto sugerido pela empresa. Neste caso, relativamente ao processo de marcação de rolhas, com ênfase nos métodos de fabricação dos carimbos e nos dados estatísticos de encomendas que lhes estão subjacentes. É também realizada uma análise à metodologia a ser aplicada no cálculo do período de recuperação do investimento.

3.1 Marcação de Rolhas

Visto que o tema da dissertação se enquadra no processo de marcação de rolhas é importante a sua explicação em pormenor.

A marcação é um processo de acabamento que consiste na impressão ou gravação de um design estipulado pelo cliente nas rolhas de cortiça de qualquer tipo ou classe. É uma operação que tem influência direta no aspeto final do produto e pode ser realizada de 3 maneiras distintas: marcação a laser, marcação a fogo ou por indução e a marcação a tinta.

A preferência de um processo de gravação em detrimento a outro, depende inteiramente do cliente. Podem ser utilizados 1, 2 ou os 3 métodos para a marcação de uma mesma rolha, cada um produz um efeito ligeiramente diferente no *design* da marca inserido na rolha, tal como é possível observar na figura 3.1. A cadência de marcação e o tempo de preparação da máquina variam para cada método. De modo a entender melhor cada processo e as suas diferenças no contexto da produção segue-se uma explicação detalhada de cada um.



Figura 3.1: Os três tipos de marcação de rolhas, da esquerda para a direita: marcação a laser, marcação a fogo e marcação a tinta.

3.1.1 Marcação a Laser

O tipo de marcação mais versátil e com melhor resolução é a marcação a laser. No entanto, é um processo que requer um elevado investimento inicial e não apresenta uma cadência de produção tão elevada como os restantes métodos explicitados. Com base nisto, é um recurso que acrescenta mais valor às rolhas e é, portanto, mais indicado para rolhas de uma qualidade superior.

O processo em si consiste na queima da superfície da rolha via laser, sem a necessidade de utilização de um carimbo/marca externa. O design requerido é fornecido e exportado para a máquina num ficheiro digital específico. O processo de marcação compreende a escolha deste ficheiro por um operário, onde já se encontram todas as informações acerca das características das rolhas a serem marcadas. Existe uma calibração mecânica, que é necessária fazer consoante o tamanho das rolhas, e uma digital, para ajustar a intensidade do feixe laser, ambos realizados pelo operador. Uma rolha teste é marcada para verificar se está tudo em concordância e, após inserir a quantidade de encomenda, a marcação é iniciada. Caso o *design* não esteja centrado, o ajuste de posição é realizado digitalmente pelo operador.

Na figura 3.2 está apresentada o conjunto de máquinas que realizam este processo de marcação, o painel digital que complementa o seu funcionamento e o ato de impressão do *design* da marca na rolha segundo este método.



Figura 3.2: Equipamento utilizado para efetuar a marcação a laser (esquerda), painel de controlo digital (centro) e marcação de uma rolha (direita).

3.1.2 Marcação a Fogo/Indução

A marcação por indução compreende, essencialmente, o aquecimento de peças (marcas) em aço inoxidável 316 que contêm, em relevo, o espelho do padrão que se pretende marcar, por queimadura, na rolha. Dentro deste processo distinguem-se 3 tipos de marcas:

- Marcas corpo;
- Marcas topo;
- Códigos.

As marcas corpo são peças retangulares utilizadas para marcar o corpo das rolhas. Estas contêm 3 detalhes importantes à sua utilização: cortes longitudinais para fixação na máquina (3), um entalhe no plano de marcação onde são inseridos os códigos (1) e um furo cego lateral para a inserção de uma sonda de controlo de temperatura (2). Um exemplo destas marcas é apresentado nas imagens da figura 3.3 que contém os detalhes mencionados.

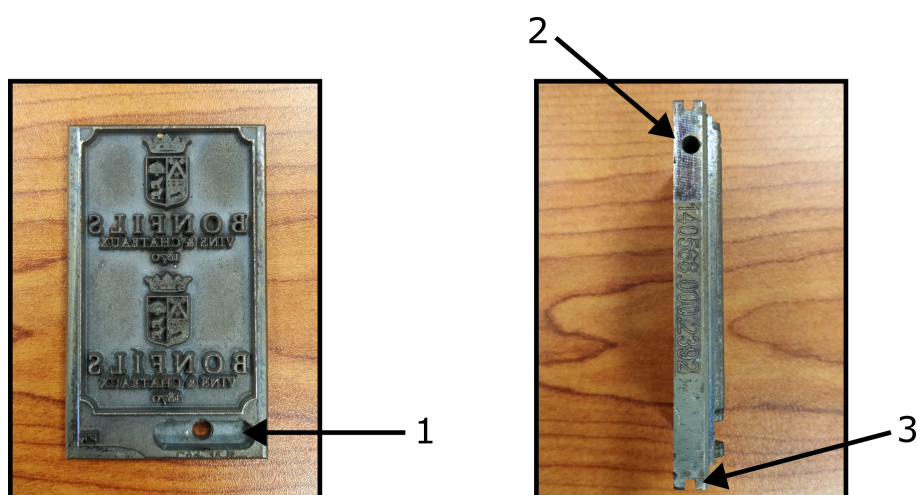


Figura 3.3: Exemplo de uma marca corpo com todos os seus detalhes; (1)- entalhe para inserção de códigos, (2)- furo para controlo de temperatura, (3)- cortes longitudinais para fixação no equipamento de marcação.

O processo de marcação deste tipo de peças principia com a colocação manual de uma peça código na marca corpo. Estes códigos têm, na sua generalidade, as mesmas dimensões e portanto podem ser utilizadas em marcas distintas. O código apresentado na figura 3.4 contém as dimensões mais usuais e destina-se à marcação de rolhas para o engarrafamento na semana 35 do ano 2020. Há, no entanto, alguns clientes nos quais este tipo de codificação é distinta tanto em termos de dimensões como na informação que dispõem, pelo que as marcas corpo necessitam de rasgos com dimensões concordantes.

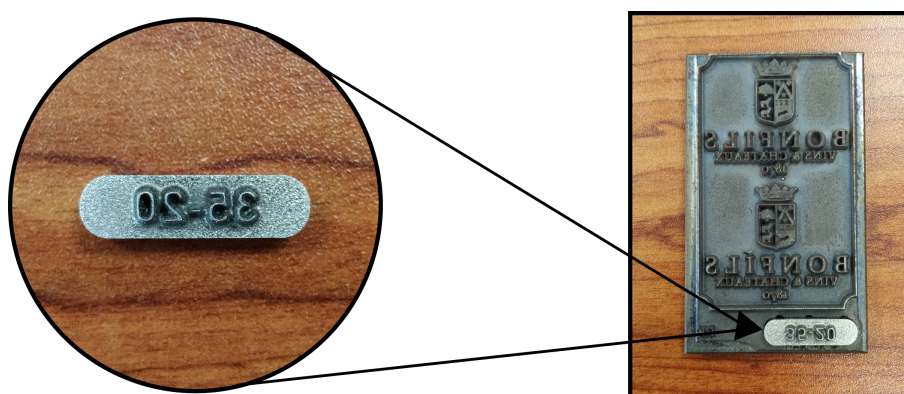


Figura 3.4: Exemplo de uma marca com código e os seus pormenores.

O carimbo (marca) é, de seguida, posicionado na máquina de marcação, como se pode verificar nas imagens da figura 3.5, onde é ajustado transversalmente e verticalmente de acordo com o tipo de rolha que está a ser marcada. A fixação das marcas é conseguida através dos cortes maquinados na peça (1). Um sensor de temperatura (2) é inserido no furo cego lateral da marca e, em seguida, é definido digitalmente a temperatura de trabalho, geralmente entre os 500°C e 700°C, que compreende o aquecimento de uma resistência (3) por meio de um gerador. Este processo

possibilita o aquecimento da marca até à temperatura estabelecida por condução térmica, onde o controlo é realizado através do sensor de temperatura.

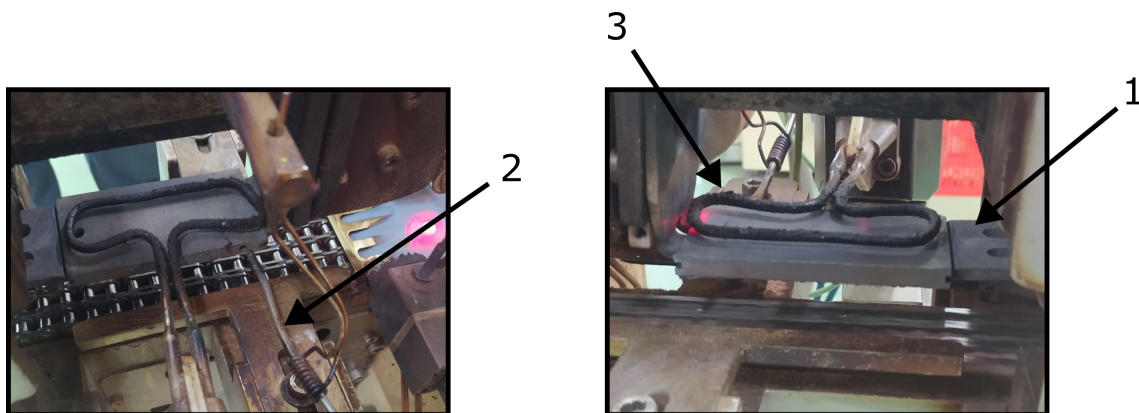


Figura 3.5: Marca corpo fixada no equipamento de marcação; (1)- elementos de fixação das marcas corpo, (2)- sonda de controlo de temperatura, (3)- resistência de aquecimento.

Quando a marca atinge a temperatura desejada, o operador realiza um teste de marcação. De seguida, inspeciona a rolha acompanhado, ou não, pelo cliente, para verificar se a marcação está com o tom desejado e se a queimadura é uniforme e centrada. Algum problema nesta fase é passível de resolver com a alteração da posição ou temperatura do carimbo.

Quando a marcação é satisfatória, o operário define digitalmente a quantidade de encomenda e a velocidade de produção para que a automatização do processo de marcação seja iniciada. As imagens da figura 3.6 apresentam dois exemplos de máquinas onde este processo é realizado.

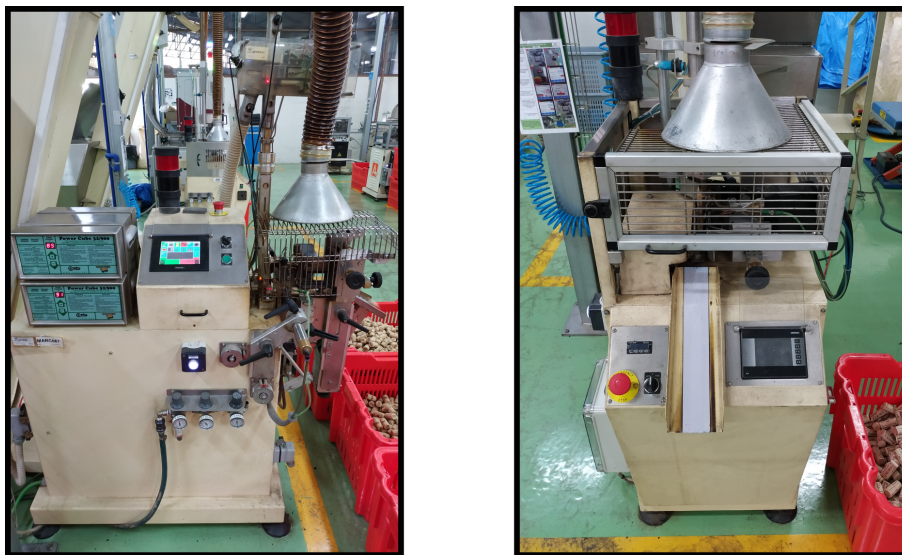


Figura 3.6: Equipamento utilizado para efetuar a marcação a fogo.

Alguns clientes requerem também a marcação dos topos das rolhas. No ambiente industrial onde foi realizada a dissertação, esta componente é exclusivamente efetuada por indução. A forma dos carimbos de topos é distinta da dos apresentados anteriormente mas o processo de marcação

é idêntico, na medida em que existe um sistema de fixação específico, sensor de temperatura e sistema de aquecimento. Um exemplo destas marcas e o resultado deste tipo de marcação estão presentes nas figuras 3.7 e 3.8, respetivamente.



Figura 3.7: Exemplo de uma marca topo.



Figura 3.8: Marcações realizadas no topo de duas rolhas.

Um detalhe importante para todas as configurações da marcação a fogo é a altura/profundidade da zona de marcação. Esta dimensão compreende a distância entre o plano superficial do *design* e o plano onde este termina (e a base da peça começa), demonstrado pela figura 3.9. Este distanciamento é fulcral, na medida em que permite que a rolha, ao ser marcada, não entre em contacto com a base do carimbo e a marcação fique defeituosa. Para este tipo de marcação, esta distância tem um valor de aproximadamente 2[mm].

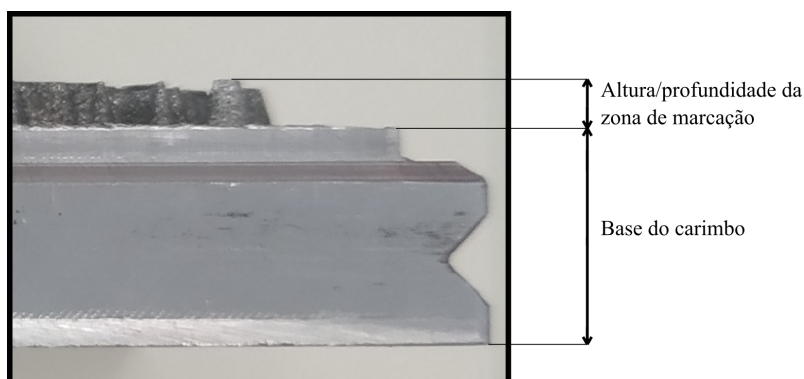


Figura 3.9: Clarificação da altura da zona de marcação e base de uma marca corpo.

3.1.3 Marcação a Tinta

O tipo de marcação mais usual é a tinta. É um processo distinto aos já explicitados pois resume-se à impressão de tinta na superfície da rolha.

O modo de operação deste método principia com a obtenção da marca, que é recebida plana. Esta chapa é curvada manualmente pelo operador, com o auxílio de uma ferramenta mecânica apresentada na figura 3.10, por forma a ficar com o formato indicado ao encaixe/cunho presente na máquina impressora. O material que compõe esta chapa é uma liga de zinco maleável. Como o processo de marcação não envolve elevadas temperaturas ou grandes esforços na marcação, foi escolhido este material que, em concordância com o seu processo de fabrico, explicado mais adiante, permite a produção de *designs* complexos numa chapa maleável. Neste tipo de marcação, a altura da zona de marcação é mais curta que para a marcação a fogo, apresentando aproximadamente 1[mm].

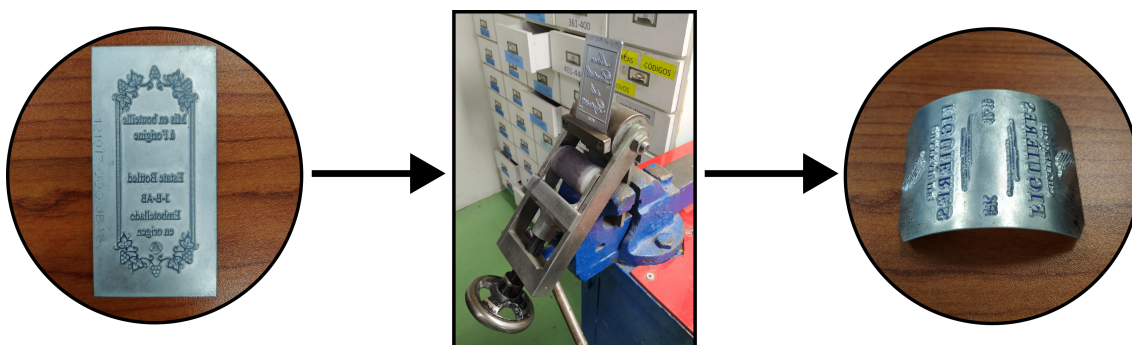


Figura 3.10: Marca de liga de zinco antes e depois da deformação e ferramenta utilizada para curvar a marca.

A máquina de marcação a tinta apresentada nas imagens da figura 3.11 é essencialmente constituída por 5 componentes que permitem a impressão do design na rolha: o depósito de tinta (1), os 4 rolos de transporte de tinta (2, 3, 4 e 5), o semi-cilindro de encaixe do marcador (6) e o marcador/cunho metálico (7). Após a marca ser fixada no cunho, este é encaixado na máquina de marcação onde o seu funcionamento consiste na passagem de tinta desde o depósito até ao cunho metálico através dos vários cilindros. Para que a perda de tinta seja minimizada, durante o funcionamento, o cilindro (3) oscila em contacto com o cilindro (2) e o (4) através de um sistema de molas de tração.

Posteriormente à marcação, as rolhas necessitam de aproximadamente 2 horas em repouso ou alguns segundos sob radiação UV para que a tinta fique consolidada na sua superfície e o produto esteja pronto para o próximo processo industrial.

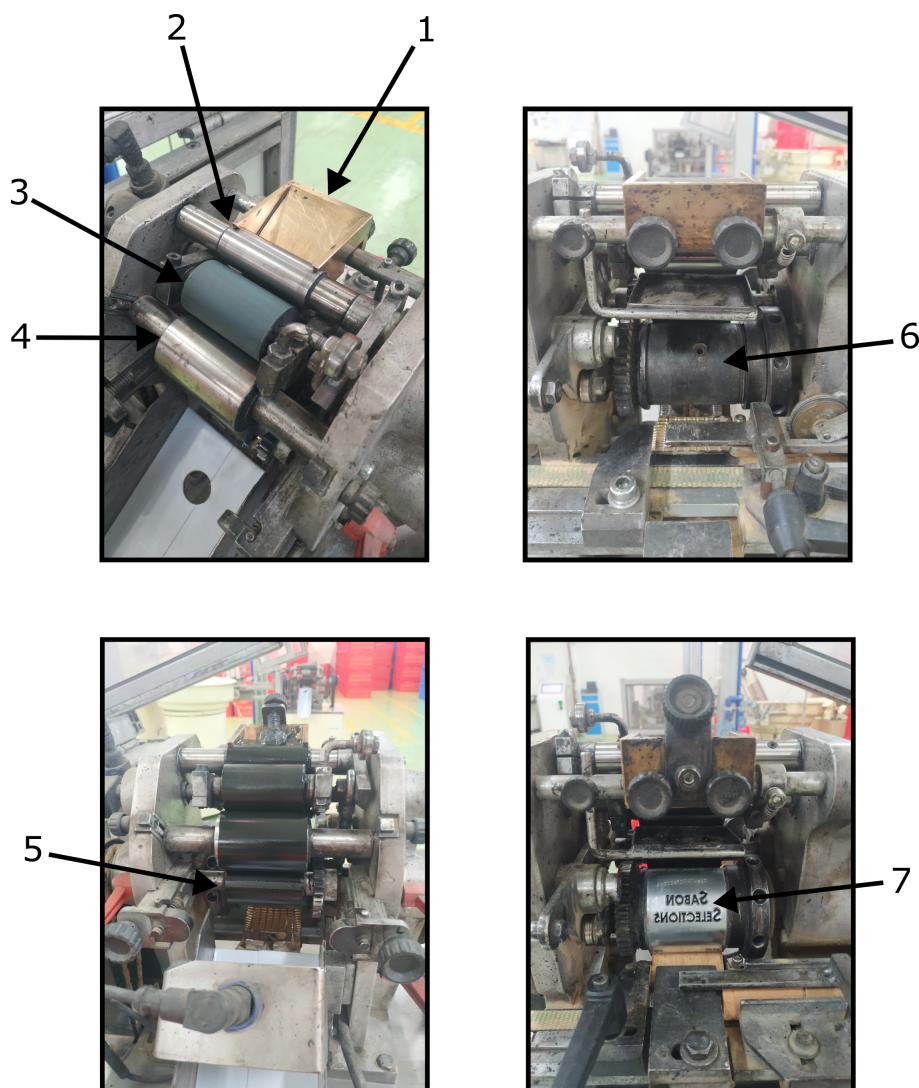


Figura 3.11: Componentes do equipamento de marcação a tinta; (1)- depósito de tinta, (2, 3,4 e 5)- rolos de transporte de tinta, (6)- encaixe do marcador, (7)- marcador/cunho metálico

3.2 Materiais e Processos de Fabrico de Carimbos para Marcação de Rolhas

Como se verifica nos processos explicados anteriormente, existe uma necessidade da obtenção das marcas/carimbos para a marcação das rolhas, tanto por indução como por tinta, por parte da empresa. Esta necessidade implica a dependência de fornecedores/fabricantes aos quais são feitas ordens de encomendas de quantidades variáveis de marcas.

Nas figuras 3.12 e 3.13 é demonstrado, em detalhe, imagens ao microscópio das zonas de marcação de um carimbo exemplar de cada tipo de marcação.

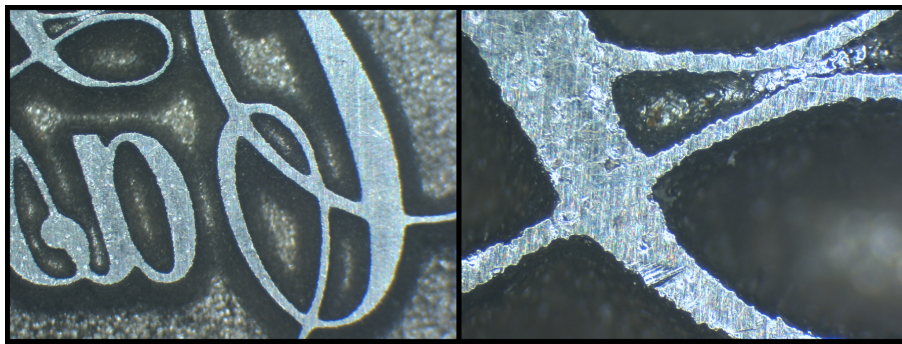


Figura 3.12: Imagens microscópicas de detalhes de um carimbo para marcação a fogo com uma objetiva de 1x com um zoom de 7.5x (esquerda) e 30x (direita).

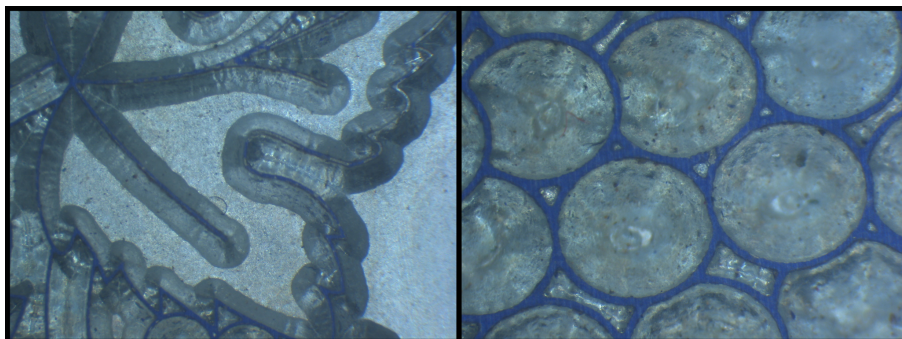


Figura 3.13: Imagens microscópicas de detalhes de um carimbo para marcação a tinta com uma objetiva de 1x com um zoom de 7.5x (esquerda) e 20x (direita).

Cada uma destas ferramentas de marcação tem diferentes necessidades mecânicas, térmicas e de *design*. Estas diferenças resultam em processos de fabrico distintos que são explicitados seguidamente.

3.2.1 Carimbos para Marcação a Fogo/Indução

De modo a fazer uma análise completa a este tipo de marcas, contactou-se o seu fornecedor, onde se obteve uma explicação detalhada do processo de produção dos carimbos para marcação a fogo. O processo começa com a chegada da ordem de encomenda, onde estão estipuladas as quantidades e características da marca a ser produzida. O *design* a ser reproduzido na peça é fornecido virtualmente no qual são feitos alguns ajustes por um desenhador, se necessário, antes de passar para a produção.

São cortadas peças retangulares de grafite, com aproximadamente as mesmas dimensões das peças a produzir, a partir de uma barra. Estas peças são retificadas manualmente e seguem para uma fresadora com comando numérico computadorizado (CNC). O *design* fornecido ao desenhador é convertido em *G-code*, transferido para a fresadora e maquinado na peça de grafite que fica com um aspeto similar ao da figura 3.14.



Figura 3.14: Exemplo de uma peça, em grafite, necessária ao processo de fabricação da marca (ferramenta para eletroerosão).

Esta peça é, em seguida, conduzida para uma máquina de eletroerosão onde vai servir de ferramenta (ânodo) para maquinar um modelo rectangular de aço inoxidável 316 (cátodo). Este último é obtido a partir do corte de uma barra com dimensões pré definidas pelo fabricante. A geometria é erodida por meio das descargas elétricas, inerentes ao processo de eletroerosão e demora entre 1:30-2:00 horas a ser obtida. Esta peça é a “fêmea” para o “macho” correspondente à peça de grafite. As imagens da figura 3.15 retratam a fresadora CNC e a máquina de eletroerosão utilizada pelo fornecedor.

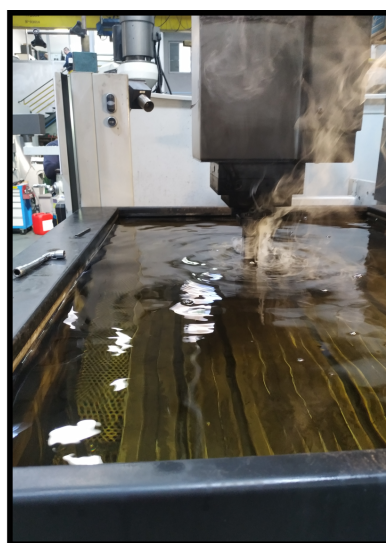


Figura 3.15: Fresadora CNC (esquerda) e máquina de eletroerosão (direita) utilizados para produção de marcas fogo.

Por fim, antes da peça estar pronta para ser expedida, os furos e cortes necessários para a fixação na máquina, sensor de temperatura e colocação dos códigos são maquinados numa fresadora CNC.

As marcas topo e os códigos são também produzidas pelo mesmo fabricante. O processo de fabrico referente às primeiras compreende a maquinagem de barras cilíndricas de aço inox num torno CNC que permite dar a forma pretendida. A base dos códigos é maquinada a partir de uma chapa metálica. Para a criação dos *designs* ou números presentes em ambos é empregue a eletroerosão e, por vezes, a maquinagem a laser.

3.2.2 Carimbos para Marcação a Tinta

Da mesma forma que para a marcação por indução, contactou-se o fornecedor de carimbos para marcação a tinta para compreender os processos de fabrico envolvidos na sua fabricação. Verificou-se que o processo consiste na maquinagem química de chapas metálicas de uma liga de zinco.

O processo inicia-se com a receção das ordens de encomenda. Nestas ordens, idênticas às do processo anteriormente descrito, encontra-se a quantidade e características das marcas a serem produzidas. Os *designs*, fornecidos digitalmente, são impressos num papel químico e cortados individualmente ou em conjunto, tendo em conta as suas dimensões tal como demonstra a figura 3.16.



Figura 3.16: *Designs* impressos em papel químico.

As chapas metálicas de liga de zinco (não foi fornecida informação acerca da liga específica utilizada) são armazenadas num local sem exposição luminosa, visto que possuem uma camada foto-protetora na superfície que seria danificada. São dispostos, manualmente, vários *designs* nesta superfície, de maneira a otimizar o espaço disponível. O conjunto, é transferido para uma máquina fotográfica onde é submetido a vácuo e, seguidamente, a uma quantidade de impulsos de radiação UV, conforme está retratado na figura 3.17. A ação deste tipo de radiação sobre o papel químico permite a remoção da camada foto-protetora na chapa metálica que vai possibilitar o desbaste químico das zonas desprotegidas no processo seguinte.

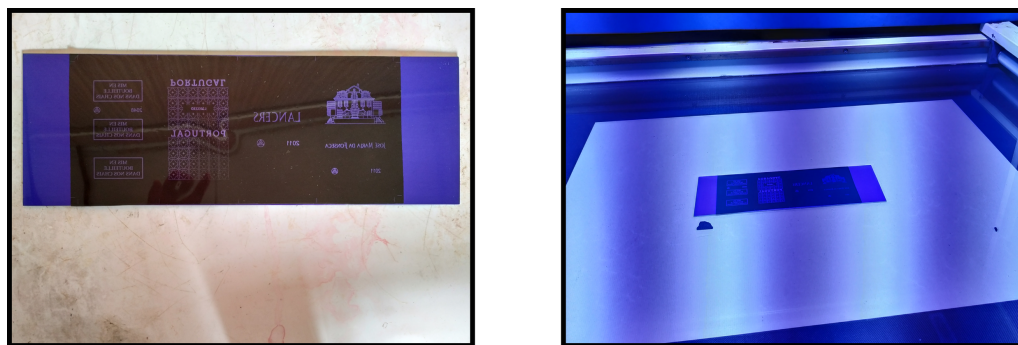


Figura 3.17: Disposição dos *designs* na superfície da chapa (esquerda) e sua introdução no equipamento fotográfico (direita).

O conjunto é retirado da máquina fotográfica e o papel químico é removido. A chapa metálica passa em seguida para um equipamento, apresentado na figura 3.18, onde vai ser aplicado um banho de solução ácida a uma determinada temperatura. A concentração e temperatura da solução são definidas com base na espessura e rugosidade especificada pela ordem de encomenda.



Figura 3.18: Equipamento de maquinagem química.

A placa, já maquinada, é mergulhada em água para que o ácido seja diluído, permitindo o seu manuseamento, e fica com o aspeto da figura 3.19. Por último, as peças são separadas, com o auxílio de uma ferramenta de corte, e são remetidas ao cliente.



Figura 3.19: Aspetto final da placa quimicamente maquinada.

3.3 Custos Associados aos Processos

Para averiguar a viabilidade das novas soluções, é necessária a realização de uma análise económica particular a este processo. Isto compreende apurar os custos associados à obtenção das marcas, a quantidade de encomendas realizadas, periodicidade com que estas são efetuadas e para que filial da empresa é que se destina o pedido. Desta forma, pretende-se investigar os setores e unidades industriais onde se deve focar o estudo de investimento, por forma a cumprir com a meta estabelecida.

Analisaram-se os dados referentes à compra de marcas por parte da empresa no ano 2018. Esta informação delimita a data de encomenda, o nome do fornecedor e a unidade de destino, descrição, quantidade, valor e possível desconto do produto requisitado.

Organizou-se esta informação de maneira a agrupar os dados em função do tipo de marcação, por indução ou tinta, da variedade do carimbo (marca em liga de zinco, código, marca corpo e marca topo) e da unidade industrial para onde foi feito o pedido. O gráfico da imagem 3.20, compara os valores dos consumíveis de marcação a tinta com os de marcação por indução, para o ano de 2018. Por motivos de confidencialidade estes valores estão em formato percentual.

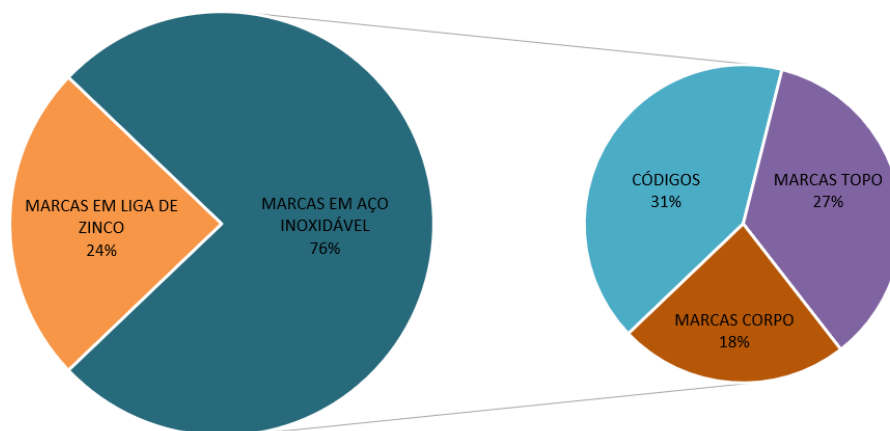


Figura 3.20: Distribuição dos gastos da empresa na obtenção de marcas.

Por forma a avaliar e delimitar os requisitos associados ao processo produtivo e seleção de material, é necessária a obtenção de alguns dados estatísticos no que toca às quantidades de peças e encomendas realizadas pela entidade em questão. Construiu-se a tabela 3.1 que explicita os dados referentes a estas ordens de encomenda. Por forma a manter a confidencialidade de informação da empresa, os valores de quantidades aqui apresentados não são os reais, mas multiplicados por uma constante e os preços médios unitários são definidos como $C_{o(t)}$, $C_{o(c)}$, $C_{o(mt)}$ e $C_{o(mc)}$, para cada tipo de marca respetiva, para que seja possível a sua análise nos capítulos seguintes.

Tabela 3.1: Dados referentes às encomendas de marcas realizadas pela empresa

	Marcação por Tinta	Marcação por Indução		
	Marcas em Liga de Zinco	Códigos	Marcas Topo	Marcas Corpo
Quantidade de peças	8718	4266	1470	844
Quantidade de encomendas	225	112	119	111
Média de peças por encomenda	38.8	38.1	12.4	7.6
Média de peças por dia	38.8	16.7	6.5	3.3
Preço médio por unidade (C_o)	$C_{o(t)}$	$C_{o(c)}$	$C_{o(mt)}$	$C_{o(mc)}$

3.4 Investimento para *Payback* em 2 anos

Como já foi mencionado no capítulo 1, um dos objetivos do projeto consiste na obtenção de recuperação do investimento, ou *Payback*, num espaço de tempo inferior a 2 anos. Este critério de decisão de projetos de investimento, apesar das suas limitações como indicador de rentabilidade, foi o escolhido devido à sua simplicidade de aplicação e por ser um bom método de *ranking* de várias alternativas (Lopes, 2012).

Tendo em conta a formulação do período de recuperação (PR) explicitada na equação 2.1, pode-se identificar que, no caso específico desta dissertação, o custo do investimento (CI) estará relacionado com os gastos associados à obtenção da maquinaria, do *software* e os custos associados à sua implementação no chão de fábrica. No que toca aos *cash-flows* (*cf*) estimados e gerados por este tipo de investimento, são baseados na margem que é possível obter entre os preços médios de obtenção das marcas pelo processo original e os custos de fabricação das mesmas mediante as novas estratégias possíveis de serem implementadas, tendo em conta a quantidade de peças e encomendas necessárias por ano. Desta forma, definiu-se a margem obtida por unidade (*M*) através da seguinte equação:

$$M = C_o - C_f \quad (3.1)$$

Este valor, sendo positivo, significa que o custo de fabricação de uma peça pelo novo processo é inferior ao custo de obtenção da mesma pelo processo original e, sendo negativo, exatamente o contrário. Pretende-se aplicar esta fórmula para as marcas para tinta (M_t) e para os códigos (M_c), marcas topo (M_{mt}) e marcas corpo (M_{mc}) em aço inox, onde C_o representa o custo original de obtenção da peça e C_f o custo de fabricação por meio do processo implementado. É preciso notar que este último pode ser sub-dividido em várias parcelas presentes na equação 3.2 onde C_C , C_M e C_{PP} representam, respetivamente, o custo dos consumíveis inerentes à produção, o custo do material e o custo de pós-processamento para a fabricação de uma unidade de um tipo de marca.

$$C_f = C_C + C_M + C_{PP} \quad (3.2)$$

Desta forma e tendo em conta a dificuldade na previsão da variação dos *cash-flows* de ano para ano, considera-se este valor constante (cf_A) e dependente do número médio de marcas necessárias anualmente (N). Pode-se então reescrever a equação 2.2 em função das variáveis estipuladas:

$$PR = \frac{CI}{N \cdot M} \quad (3.3)$$

Mas como a margem obtida por unidade (*M*) pode ser simplificada segundo as equações 3.1 e 3.2, tem-se finalmente:

$$PR = \frac{CI}{N \cdot (C_o - (C_C + C_M + C_{PP}))} \quad (3.4)$$

É com base nesta formulação de cálculo do período de recuperação do investimento que se pretende averiguar o cumprimento do objetivo de *Payback* inferior a 2 anos.

Capítulo 4

Trabalho Experimental

Com base nas especificidades do problema proposto, este capítulo visa analisar as possíveis soluções de novos materiais, processos de fabrico e definir fatores de comparação, tendo em conta as respetivas metodologias mencionadas no capítulo 2. Pretende-se explicitar as características das soluções encontradas e delinear a metodologia do processo experimental. Desta forma, este capítulo resume-se na:

- Delineação dos requisitos específicos para os carimbos de marcação;
- Modelação 3D dos protótipos utilizados para cada caso;
- Aplicação da metodologia de seleção de materiais e processos de fabrico aos casos de estudo;
- Identificação das soluções encontradas e caracterização dos respetivos conjuntos material-processo-equipamento a serem testados;
- Descrição dos testes adicionais que se pretendem efetuar;
- Apresentação dos objetivos do desenvolvimento de um *software* auxiliar ao projeto;
- Delineação dos fatores de comparação para a seleção da solução mais indicada ao investimento.

4.1 Pesquisa de Soluções

A procura de soluções ao problema proposto pela empresa baseou-se na metodologia de uz Zaman et al. (2018), já mencionada e resumida na figura do anexo C, mas aplicada a todos os tipos de materiais e processos de fabrico. Com isto, pretende-se encontrar os conjuntos de material-processo-máquina mais indicados para cada caso de estudo, tendo em conta as condições do projeto.

No entanto, antes da aplicação da metodologia de seleção especificada, é necessário a análise das condicionantes do problema, em termos de funcionalidade, ligados às necessidades mecânicas e térmicas dos objetos, e em termos logísticos, relacionados com a cadência de produção exigida.

É também necessário estabelecer os *designs* e dimensões dos carimbos que se pretendem fabricar para que haja uniformidade nos testes dentro de cada tipo de marcação.

4.1.1 Requisitos dos Carimbos de Marcação

Os requisitos dos carimbos estão diretamente associados ao processo específico de marcação das rolhas e condicionados pelas respectivas máquinas empregues pela entidade empresarial.

Em ambos os processos de marcação, a característica imperativa e mais condicionante das marcas/carimbos é a espessura das paredes do *design*. Devido à natureza particular, variável e, em alguns casos, exclusiva dos artigos para os quais são produzidas as rolhas de cortiça, os *designs* requeridos são variados e distintos tanto em termos de complexidade como resolução de imagem. É natural que, para imagens demasiado complexas ou com detalhes muito minuciosos, a marcação não seja perfeita e, por isso, verificou-se necessário estipular um valor mínimo de espessura de secção que fosse representativa da qualidade de imagem que se pretende imprimir nas rolhas. Com base na observação de vários *designs* de marcas de clientes da empresa, verificou-se a existência de detalhes com espessura de secção $\leq 1[mm]$.

No que toca à marcação por indução, considerou-se os esforços envolvidos na passagem da rolha pela marca insignificantes, visto que só é necessário o contacto entre a rolha e a marca para que haja transferência de calor e a consequente queima da cortiça. Estabeleceu-se os fatores térmicos como os mais relevantes para o tipo de marcação em análise. A temperatura de serviço máxima (T_{smax}) e a condutividade térmica (k) do carimbo são os que mais condicionam o processo. O primeiro, devido ao facto da peça estar sujeita a altas temperaturas em utilização, e o segundo, para garantir que a rolha é marcada na sua passagem pelo carimbo, ou seja, que a transferência de calor da marca para a rolha é eficiente. Em conclusão, os requisitos definidos para este tipo de marcação são os seguintes:

- Preservar o modo de fixação e operação da peça na máquina de marcação a fogo;
- Espessura de secção do *design* $\leq 1[mm]$;
- $T_{smax} \geq 700[^\circ C]$;
- $k \geq 10[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}]$,

onde o valor mínimo de temperatura de serviço máxima foi estabelecida como $700^\circ C$, baseado na temperatura mais elevada utilizada neste tipo de marcação. O valor mínimo estipulado para a condutividade térmica foi assente na semelhança com a do material utilizado para a produção original das peças, aço inoxidável austenítico, com $14 \leq k \leq 27[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}]$.

Na marcação a tinta os requisitos são distintos aos do processo anterior. A rigidez da marca tem que ser suficientemente elevada para que em contacto com a rolha, a imagem a imprimir não

sofra alterações. No entanto, tem que ser flexível o suficiente para permitir o encaixe no cunho de marcação. É também imperativo que o material seja resistente à tinta alimentar aplicada.

Visto que a rigidez de um material é diretamente proporcional ao seu módulo de *Young* (E), estipulou-se como requisito $1 \leq E \leq 100[Pa]$. A tensão limite de elasticidade (σ_e), afere a capacidade que um material tem de resistir à deformação plástica e portanto definiu-se $\sigma_e \geq 20[MPa]$. Resume-se então os requisitos da seguinte forma:

- Preservar o modo de fixação e operação da peça na máquina de marcação a tinta;
- Boa durabilidade em contacto com a tinta de marcação;
- Espessura de secção do *design* $\leq 1[mm]$;
- $1 \leq E \leq 100[Pa]$;
- $\sigma_e \geq 20[MPa]$,

onde os valores estipulados para o módulo de *Young* (E), foram baseados no limite máximo e mínimo dos materiais da família de espumas e cerâmicos técnicos, respetivamente, que se consideraram não viáveis para esta aplicação por serem demasiado maleáveis ou rígidos. Da mesma forma, a tensão limite de elasticidade (σ_e) foi estabelecida como superior ao limite máximo da família dos materiais cerâmicos tradicionais.

Para validar os processos em termos logísticos, é preciso ter em conta que o método de produção selecionado tem de dar resposta às necessidades produtivas da empresa. Desta forma, é preciso que a cadência do método produtivo das marcas seja superior ao número de carimbos necessários, num mesmo intervalo de tempo.

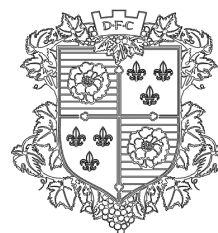
Com base na tabela 3.1 depreende-se a necessidade média diária de cada tipo de marcas. Aproximado às unidades a procura de marcas para tinta é de 39 unidades. No caso da marcação a fogo, verificou-se uma necessidade média de 17 códigos, 7 marcas topo e 4 marcas corpo. Estes valores vão servir de base para avaliar a cadência dos equipamentos testados.

4.1.2 Modelação de Protótipos das Marcas

Por forma a simplificar a análise dos problemas em questão, idealizaram-se dois *designs* distintos, demonstrados pelas figuras 4.1 e 4.2, para a marcação a fogo e tinta, respetivamente. A primeira foi desenhada de raiz e a segunda com base num carimbo já existente, de um dos clientes da empresa. Estes *designs* foram escolhidos por possuírem detalhes de grande e pequena complexidade, por forma a ser possível verificar as capacidades dos conjuntos material-processo-máquina, na produção dos dois tipos de geometrias.



Figura 4.1: *Design* idealizado para a produção dos carimbos de marcação a fogo.



DOMAINE
FRANCO CHINOIS
中法庄园

Figura 4.2: *Design* idealizado para a produção dos carimbos de marcação a tinta.

Nas figuras do anexo D, estão indicados os desenhos técnicos associados aos respectivos carimbos que se pretendem fabricar. Com o correspondente à figura D.1, tenciona-se a marcação por fogo de rolhas de calibre $44 \times \varnothing 26[mm]$, $45 \times \varnothing 26[mm]$ ou maiores, e com o correspondente à figura D.2, a marcação a tinta de rolhas de calibre $43 \times \varnothing 24[mm]$ ou maiores. Estes modelos têm o *design* espelhado, tal como demonstram as figuras 4.3 e 4.4, de forma a que a imagem impressa nas rolhas esteja correta. As cotas estipuladas nos desenhos de construção em anexo estão fundamentadas em medições efetuadas a peças reais utilizadas pela empresa. Nas figuras seguintes indicam-se as medidas das espessuras de secção de alguns detalhes dos *designs*.

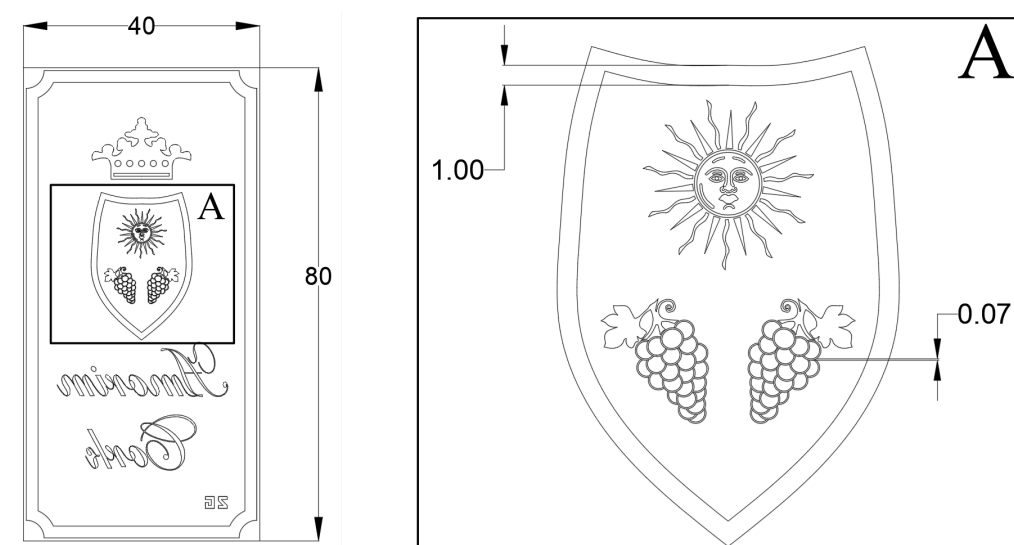


Figura 4.3: Vista de frente do carimbo idealizado para a marcação a fogo com alguns detalhes dimensionados.

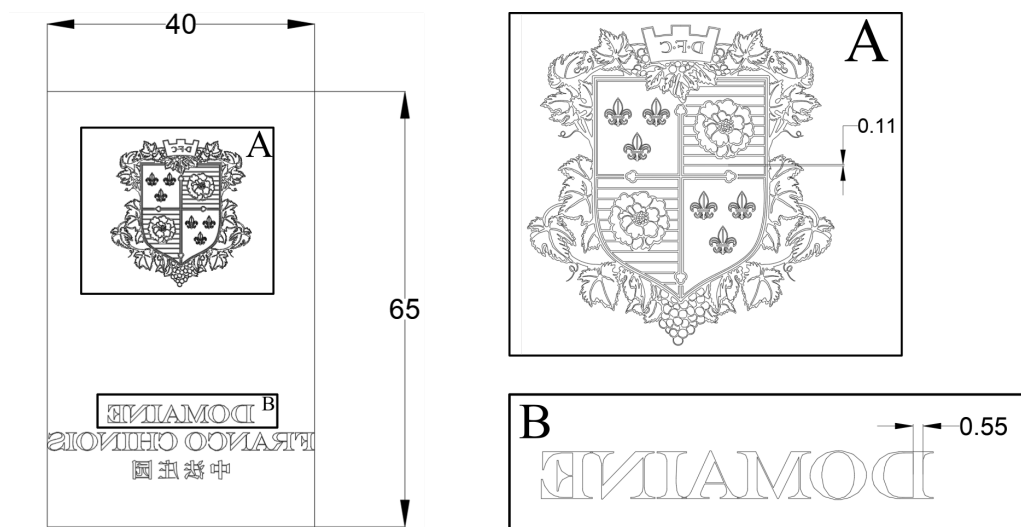


Figura 4.4: Vista de frente do carimbo idealizado para a marcação a tinta com alguns detalhes dimensionados.

4.1.3 Aplicação da Metodologia de Seleção de Materiais e Processo de Fabrico

Apesar da metodologia explicitada por uz Zaman et al. (2018) ser referente ao apuramento de materiais e processos no âmbito de fabrico aditivo, considerou-se que os princípios definidos na literatura poderiam ser adaptados a processos de fabrico na sua generalidade. Visto isto, esta secção pretende a execução desta metodologia para os dois casos em estudo, mas tendo em conta todas as possibilidade de processos de fabricação e não exclusivamente o fabrico aditivo.

A metodologia principia com a *translation of requirements* ou tradução dos requisitos, onde se pretende identificar os requisitos do *design*, do material e do processo de fabrico com base na peça a desenvolver. Segundo a modelação das marcas e as suas respetivas restrições estabelecidas anteriormente, pode-se aplicar esta etapa e definir os requisitos do processo-produto:

Marcação a Fogo

- Processo capaz de produzir o *design* com boa definição de imagem;
- Processo que permita a fabricação de peças com as dimensões definidas;
- Material capaz de suportar a temperatura de serviço estipulada sem que as suas propriedades sejam modificadas;
- Material com condutividade térmica suficientemente alta para permitir a marcação das rolhas.

Marcação a Tinta

- Processo capaz de produzir o *design* com boa definição de imagem;
- Processo que permita a fabricação de peças com as dimensões definidas;
- Compromisso de rigidez de forma a que não haja deformação da marca em contacto com as rolhas e possibilite a fixação no cunho de marcação;
- Material com resistência química à tinta usada na marcação.

Segue-se a etapa de triagem onde se pretende rejeitar os materiais e processos que não possuem as características mínimas, necessárias ao projeto. Utilizou-se o *software GRANTA EduPack 2020* para auxiliar neste processo de apuramento. Estipulou-se, primeiramente, uma base de dados de materiais agrupados pela sua respetiva classe (*MaterialUniverse: All Materials*) os quais foram ordenados, graficamente, segundo as características a serem avaliadas no anexo F. Por forma a normalizar a construção dos gráficos, estabeleceu-se o eixo das abcissas (xx) para os parâmetros em análise e o das ordenadas (yy) para um parâmetro fixo, neste caso, o módulo de *Young* (E).

Para a marcação por indução, analisou-se a condutividade térmica e a temperatura máxima de serviço. A primeira análise, presente no gráfico da figura F.1, consistiu em restringir os resultados a materiais com $k \geq 10[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}]$. Na segunda, delimitou-se $T_{smax} \geq 700[^\circ C]$ aos resultados da primeira análise, concluindo na figura F.2.

Na marcação a tinta, restringiu-se os materiais aos com durabilidade aceitável e excelente a óleos vegetais (maior constituinte da tinta de impressão), com $1 \leq E \leq 100[GPa]$ e $\sigma_e \geq 20[MPa]$, demonstrado pelos gráficos da figuras F.3 e F.4, respetivamente. Comparativamente às restrições delimitadas para o caso anterior, as aplicadas para os carimbos de marcação a tinta resultam numa quantidade de materiais aceites mais significativa.

No que toca à triagem dos processos de fabrico, aplicou-se o mesmo procedimento. Tendo em conta que se pretendem métodos que permitam a fabricação de peças tridimensionais (3D) e com uma espessura de secção $\leq 1[mm]$, estipulou-se a tolerância de fabricação $\leq 0.5[mm]$. Esta análise foi realizada no mesmo *software* mas com a base de dados de *ProcessUniverse: Shaping*, ou seja, processos ligados ao fabrico e modelação de materiais. O parâmetro fixo escolhido para o eixo das ordenadas (yy) foi o custo de capital estimado do processo. Dentro dos 146 processos de fabrico existentes na base de dados, a triagem restringiu-os a 35 que cumprem estes requisitos.

A hierarquização é a etapa que sucede a triagem no processo de seleção. Pretende-se a aplicação de critérios de otimização de maneira a que seja possível ordenar os materiais e/ou processos segundo as características desejáveis para a respetiva aplicação. No que toca ao domínio dos materiais procurou-se otimizar as suas características em função do preço por quilograma ($\text{€}/kg$). No caso da marcação a fogo, relacionou-se a condutividade térmica ($\frac{k}{\text{€}/kg}$) e na marcação a tinta, a tensão limite de elasticidade com o módulo de *Young* ($\frac{\sigma_e}{E \cdot (\text{€}/kg)}$). As figuras 4.5 e 4.6 apresentam os resultados, sob a forma de gráfico, da aplicação desta etapa aos materiais, seguidos da triagem, para a marcação a fogo e para a marcação a tinta, respetivamente. Enquanto que, na primeira, já é possível averiguar bem as classes de materiais que otimizam este parâmetro, no caso da marcação a tinta, em que a quantidade de materiais é muito superior, tem-se uma ideia mais geral ligada ao grupo de família dos materiais.

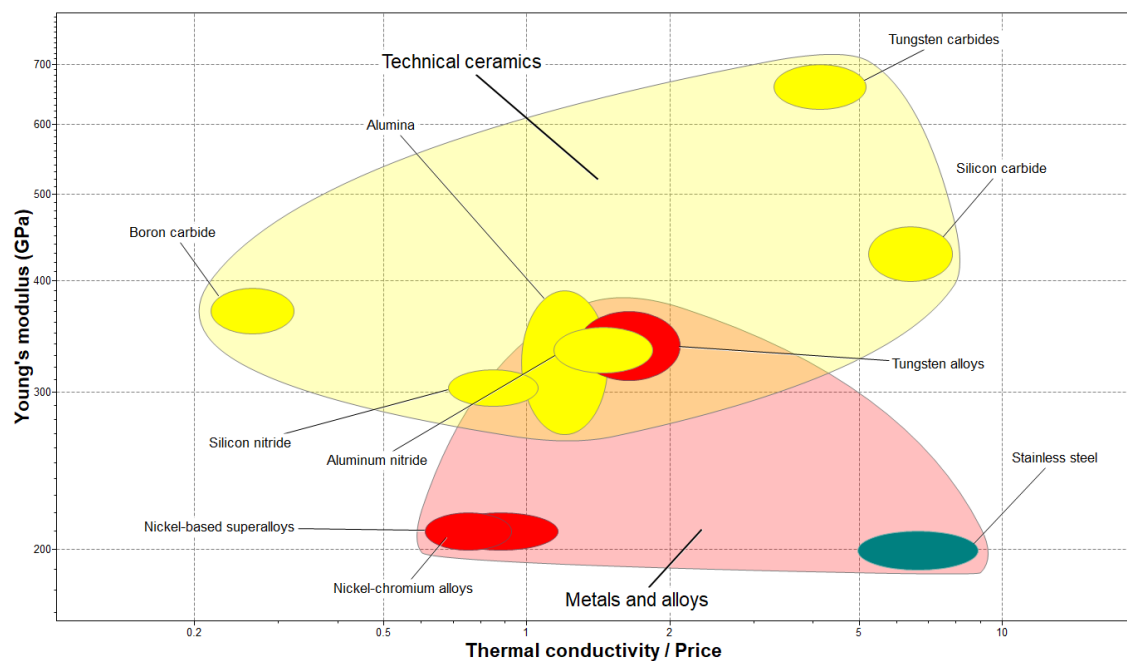


Figura 4.5: Gráfico que relaciona o módulo de *Young* (E) com a razão entre a condutividade térmica pelo preço por quilograma ($\frac{k}{\text{€/kg}}$) na etapa de hierarquização para a marcação a fogo (Granta Design Limited, 2020).

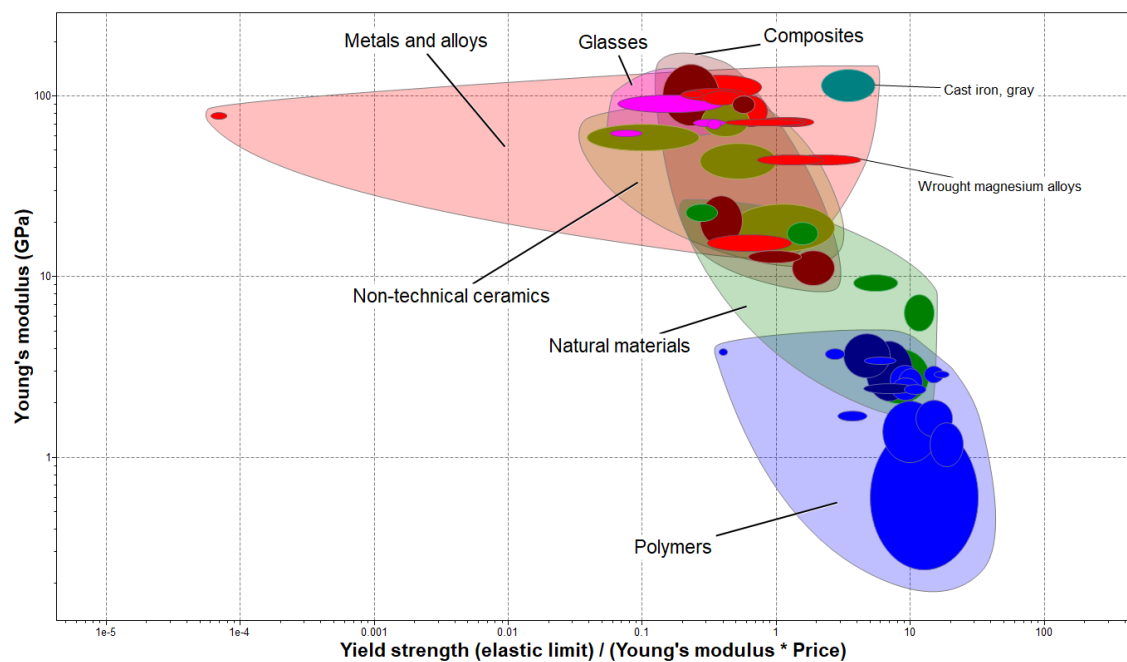


Figura 4.6: Gráfico que relaciona o módulo de *Young* (E) com a razão entre a tensão limite de elasticidade pelo módulo de *Young* e preço por quilograma ($\frac{\sigma_e}{E \cdot (\text{€/kg})}$) na etapa de hierarquização para a marcação a tinta (Granta Design Limited, 2020).

O resultado da hierarquização pode então ser resumido pelas seguintes soluções de materiais em função do tipo de marcação:

Marcação a Fogo	Marcação a Tinta
1. Aço inoxidável;	1. Polímeros;
2. Carboneto de silício;	2. Materiais naturais;
3. Metal duro (carbonetos de tungsténio);	3. Ferro fundido cinzento;
4. Outros metais e ligas metálicas;	4. Ligas de Magnésio.
5. Outros cerâmicos técnicos.	5. Outros metais, ligas metálicas e materiais compósitos.

A subsequente análise e validação dos processos, apresentada nas secções seguintes, foi realizada em função da classe ou família de materiais escolhida para cada caso. No que toca à marcação a fogo, estipulou-se o aço inoxidável como o material principal em estudo visto que, para além de ser o material com o melhor índice de otimização do conjunto, os seus processos de fabrico são, em geral, mais simples e compreensivos do que os associados aos materiais cerâmicos que o seguem na hierarquização. Em relação à marcação a tinta, concentrou-se na análise dos processos associados à produção e fabrico de materiais da família dos polímeros.

No que toca aos métodos de fabricação, favoreceu-se os que exigissem o mínimo de mão de obra e de processos complementares à produção destes componentes a pretexto de reduzir, ou pelo menos preservar, os seus prazos de obtenção.

4.2 Soluções para Marcação a Fogo

Em seguimento à metodologia aplicada anteriormente, restringiu-se os 35 processos de fabrico que cumprem os requisitos à possibilidade de produção de peças em aço inoxidável para averiguar as possibilidades de conjuntos material-processo. O *software* apresentou como possibilidade 15 métodos de fabrico distintos.

Tendo em conta que é necessária a produção de peças com diversos *designs*, procurou-se os processos que permitiam uma grande flexibilidade neste aspeto, concluindo com a eleição da gravação a laser e da fusão seletiva a laser para realizar os testes de produção.

Em ambos os casos, o aço inoxidável, austenítico, AISI 316 foi o material escolhido para o fabrico destas marcas, assentes no desenho de construção da figura D.1. Dentro desta classe de materiais, os AISI 316 são dos menos dispendiosos e possíveis de fabricar por ambas as técnicas estipuladas. As suas características gerais estão presentes na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Propriedades mecânicas e térmicas do aço inoxidável, austenítico, AISI 316 (RAMADA, 2018, 2017).

Características do Material	AISI 316
Modulo de <i>Young</i> [GPa]	165 - 200
Tensão de rotura [MPa]	500 - 980
Tensão limite de elasticidade [MPa]	≥ 205
Alongamento após rotura [%deformação]	≥ 10
Condutividade térmica [$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$]	15
Temperatura máxima de serviço [°C]	750 - 925

4.2.1 Gravação a Laser

A gravação a laser, explorada em mais detalhe no capítulo 2, é um subtipo do processo de maquinagem a laser (LBM) que consiste na fabricação de objetos por meio da ablação periódica do material. Este método de remoção de matéria permite a produção de superfícies tridimensionais com um elevado grau de complexidade.

Entrou-se em contacto com duas empresas que comercializam este tipo de equipamento por forma a averiguar a viabilidade do processo na produção do carimbo estipulado na figura D.1. Por motivos de confidencialidade vai-se referir a estas entidades como “empresa A” e “empresa B” às quais se solicitou o fabrico da peça mencionada.

Sendo este um processo de remoção de material, a estratégia de produção compreende a fixação de uma peça rectangular de aço inoxidável, ligeiramente sobredimensionada em relação à que se pretende obter, a qual é maquinada por gravação a laser segundo o *design* concedido à máquina em formato .STEP. Finalizado o processo, o resto dos detalhes necessários para a marcação são maquiados por vias de métodos convencionais.

As características do equipamento usado por cada empresa estão refletidas na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Características dos equipamentos de gravação a laser usados para a fabricação da marca estipulada

	Máquina da empresa A	Máquina da empresa B
Área de trabalho [mm^2]	190×190	300×200
Potência do laser [W]	50	48
Frequência do impulso [Hz]	-	50-200

4.2.2 Fusão Seletiva a Laser

O outro processo considerado para a fabricação dos carimbos para marcação a fogo foi a *selective laser melting* ou fusão seletiva a laser. É um método de fabrico aditivo baseado no conceito de *powder bed fusion* que permite a criação de peças tridimensionais através da fusão de pó metálico depositado em várias camadas.

A produção de peças segundo este método, em contraste com o outro eleito, é baseado na adição de material. É então possível idealizar estratégias distintas de fabricação: a produção integral, a otimizada e a híbrida. A primeira compreende a produção do modelo na sua totalidade e tal como especificado, a segunda, aproveita-se das capacidades do processo para otimizar o modelo em termos volumétricos, de forma a reduzir no tempo de fabricação e gasto em consumíveis. Por último, a produção híbrida consiste na utilização de *preforms* ou pré-formas, com um preço por quilo reduzido em relação ao pó metálico, como base de trabalho na qual o material é adicionado, permitindo reduzir também no tempo e custos de produção.

Procurou-se testar este processo com a fabricação do mesmo modelo da figura D.1 por parte de duas empresas, C e D, com equipamentos distintos e características presentes na tabela 4.3. Em consequência da peça possuir apenas uma pequena parte funcional, o *design*, considerou-se significativo o estudo da opção híbrida com a utilização de uma pré-forma de aço inoxidável AISI 316, rectangular, retificado, de dimensões $80 \times 40 \times 8 [mm^3]$. À empresa C foi pedido o fabrico mediante produção integral e produção híbrida e à empresa D exclusivamente por produção híbrida.

Tabela 4.3: Características dos equipamentos de fusão seletiva a laser usados para a fabricação da marca estipulada

	Máquina da empresa C	Máquina da empresa D
Volume de trabalho [mm^3]	$250 \times 250 \times 350$	$\varnothing 100 \times H100$
Potência do laser [W]	500	200
Diâmetro do feixe [μm]	80	55
Espessura de camada [μm]	20-100	10-50
Velocidade de produção [cm^3/h]	≤ 150	2-18

A ambas as empresas foi solicitada a utilização de pó metálico de aço inoxidável AISI 316 no processo de SLM. No entanto, por motivos de flexibilidade de produção, o pó usado pela empresa C foi uma liga de cromo-níquel denominada de *Inconel 716*. Esta liga metálica, caracterizada na tabela 4.4, tem propriedades idênticas ao aço requisitado e apresenta os requisitos mínimos estabelecidos para o projeto.

Tabela 4.4: Propriedades mecânicas e térmicas da liga metálica de cromo-níquel *Inconel 716* (Granta Design Limited, 2020)

Características do Material	<i>Inconel 716</i>
Modulo de Young [GPa]	203 - 216
Tensão de rotura [MPa]	827 - 914
Tensão limite de elasticidade [MPa]	724 - 800
Alongamento após rotura [%deformação]	35 - 50
Condutividade térmica [$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$]	11.6 - 12.6
Temperatura máxima de serviço [$^\circ C$]	632 - 705

A tabela 4.5 resume as soluções encontradas, para a marcação a fogo, apresentando os conjuntos material-processo-máquina utilizados na produção das marcas.

Tabela 4.5: Tabela resumo das soluções de material-processo-máquina encontradas para a marcação por indução

Processo de Fabrico	Gravação a Laser		Fusão Seletiva a Laser		
Empresa	A	B	C		D
Tipo de Produção Aplicada	-	-	Integral	Híbrida	Híbrida
Material Utilizado	Aço AISI 316	Aço AISI 316	<i>Inconel 716</i>	<i>Inconel 716</i>	Aço AISI 316
Área/Volume de trabalho	190 × 190	300 × 200	250 × 250 × 350		∅100 × H100

4.3 Soluções para Marcação a Tinta

Concluiu-se, com base na aplicação da metodologia de escolha de materiais e processos de fabrico, que os polímeros são a família de materiais que mais se adequa à técnica de marcação a tinta. Investigou-se, neste grupo, as classes de materiais que otimizavam o problema, evidenciado pela figura 4.7. Dentro das 17 classes apresentadas pelo *GRANTA EduPack 2020* as que surgiram como melhores alternativas foram:

1. Amido termoplástico (TPS);
2. Polipropileno (PP);
3. Poliuretano (tpPUR);
4. Politereftalato de etileno (PET);
5. Poliacetal (POM).

Da mesma forma que para a marcação por indução, a necessidade de flexibilidade na fabricação de diferentes *designs* de carimbos, direcionou a escolha para processos de fabrico aditivo. Dentro desta variedade de processos, os que passaram a secção de triagem e verificavam a possibilidade de fabricação de materiais poliméricos foram o FDM (*Fused Deposition Modeling*) e a estereolitografia.

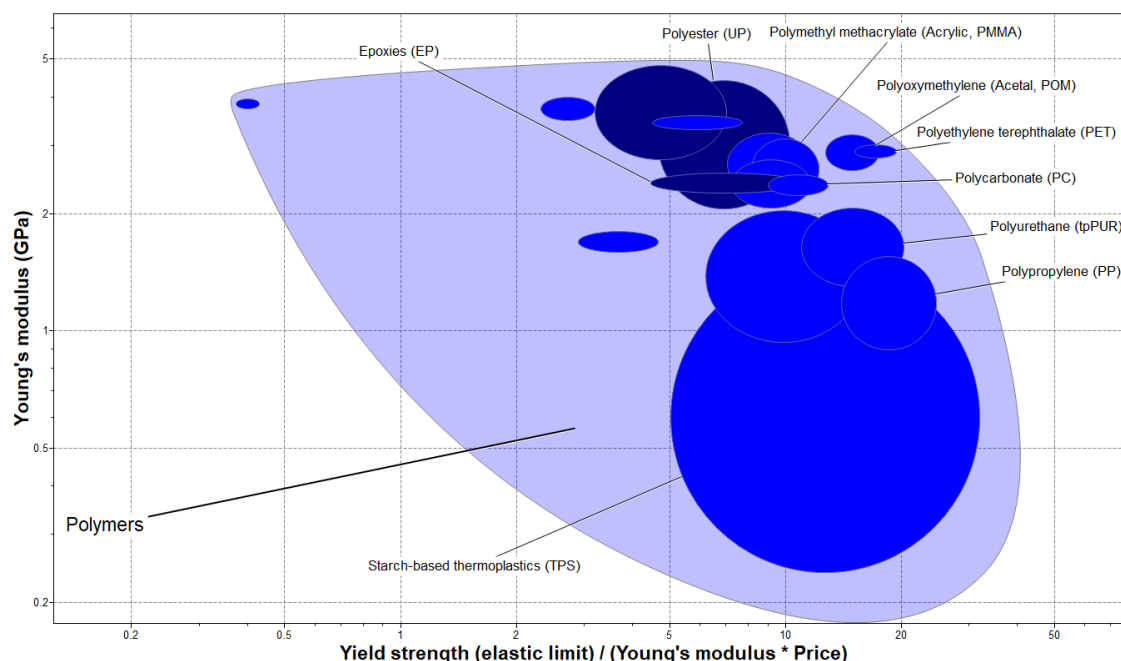


Figura 4.7: Gráfico da etapa de hierarquização para a marcação a tinta, restringido a materiais poliméricos (Granta Design Limited, 2020).

Com base nos resultados de materiais, de processos de fabrico, nas especificações do problema e nas condições locais (disponibilidade e possibilidade local para o desenvolvimento da produção), elegeram-se quatro combinações material-processo que se consideraram mais promissoras. Nestas quatro soluções, a fotopolimerização é o processo químico base que os une, mas mais especificamente, em função da otimização do material, estudou-se a possibilidade de produção de marcas em acrilato de poliuretano mediante o processo idêntico à produção de placas flexográficas. Por outro lado, com base nos processos de fabrico aditivo, a estereolitografia e, apesar de não constar nos resultados apresentados pelo *software*, o *material jetting*, foram analisados em maior detalhe. No primeiro caso, foi testada a fotopolimerização de uma resina epoxídica e, no segundo, de uma resina acrílica e de um fotopolímero que simula as propriedades de materiais elastoméricos.

4.3.1 Fotopolimerização de Placas Flexográficas

O processo de estampagem associado à flexografia é, de uma forma, idêntico à marcação de rolas por tinta. Em ambos pretende-se a impressão de *designs* num produto, através da junção entre carimbos/placas flexográficas e a ação de rolos rotativos. Tendo em conta que a maior diferença é referente ao material e processo produtivo associado a cada um, procurou-se averiguar a viabilidade da aplicação de placas flexográficas como carimbos no processo de marcação a tinta de rolas.

Entrou-se em contacto com uma empresa E, fornecedora dos materiais e equipamentos essenciais à produção deste tipo de *printing plates*. Requisitou-se a fabricação de uma placa teste

com o *design* da figura 4.2 e informação relativa à sua produção. As tabelas 4.6 e 4.7 apresentam as características e parâmetros de processamento da placa, respetivamente e a tabela 4.8 do equipamento utilizado.

Tabela 4.6: Características da placa flexográfica usada para a fabricação da marca estipulada

Características da placa	
Material	Acrilato de poliuretano
Espessura total da placa [mm]	0.95
Espessura da marca [mm]	0.75
Espessura de secção mínima [μm]	100

Tabela 4.7: Parâmetros da produção de placas flexográficas do equipamento usado

Parâmetros de Processamento	Duração [min]
Tempo de exposição	3 - 5
Tempo de lavagem (30°C)	1.5 - 4
Tempo de secagem (60°C)	10 - 20
Tempo de pós-processamento	2

Tabela 4.8: Características do equipamento de fabricação de placas flexográficas usado para a fabricação da marca estipulada

Características da Máquina	
Área máxima de trabalho [mm ²]	350 × 500
Potência da radiação UV-A [W]	50
Líquido de lavagem	Água
Potência do secador [W]	500

4.3.2 Estereolitografia

A estereolitografia é um processo de fabrico aditivo que permite o fabrico de geometrias complexas através da fotopolimerização de resinas poliméricas camada a camada, não esquecendo a necessidade de pós-processamento. Considerou-se a experimentação deste processo, principalmente por ser das técnicas de fabrico aditivo com melhor capacidade na produção de peças com elevada complexidade, sendo este o caso para a grande maioria de *designs* dos carimbos em estudo.

São vários os tipos de materiais capazes de ser fabricados a partir deste processo. Este fator depende apenas da resina polimérica e da sua admissibilidade por parte do equipamento usado. Para o objetivo em questão, seria relevante a utilização de uma resina que tivesse alguma maleabilidade.

Para testar esta hipótese, fabricou-se o objeto estipulado pela figura D.2 com a utilização de equipamento de fabrico aditivo doméstico, o *Form 2* da *Formlabs*, com características presentes

na tabela 4.9. Por motivos externos, a resina usada foi a *Clear Resin*, que resulta num material polímero rígido caracterizado pela tabela 4.10 (Formallabs, 2017; Formlabs, 2019).

Tabela 4.9: Características do equipamento de estereolitografia usado para a fabricação da marca estipulada

Características da Máquina	<i>Form 2</i>
Volume máximo de trabalho [mm^3]	$145 \times 145 \times 175$
Potência do laser UV [mW]	250
Diâmetro do feixe [μm]	140
Espessura de camada [μm]	25-100

Tabela 4.10: Características mecânicas do polímero fabricado pelo processo de estereolitografia

Características do Material	<i>Clear Resin</i>
Modulo de <i>Young</i> [GPa]	2.8
Tensão de rotura [MPa]	65
Alongamento após rotura [%deformação]	6.2

4.3.3 *Material Jetting*

O processo de *material jetting* não consta nas soluções de processos de fabrico possíveis, segundo a metodologia de seleção aplicada anteriormente. Em conformidade com o *software GRANTA EduPack 2020*, esta técnica de fabrico aditivo é rejeitada por possuir uma espessura de secção mínima $\geq 1[mm]$, confirmado pela tabela 2.4. No entanto, dado a possibilidade de testar o processo segundo o equipamento da empresa F, procurou-se avaliar e comparar o seu desempenho na fabricação da peça em relação aos outros testados.

Esta variante de fabrico aditivo consiste na deposição, camada a camada, de partículas poliméricas através de um conjunto de bocais móveis. No caso da máquina em análise, da empresa F, a deposição de material é acompanhada por um feixe de radiação UV que permite a sua polimerização. As características principais do equipamento e dos materiais testados estão apresentados nas tabelas 4.11 e 4.12, respetivamente. Para este processo, foram disponibilizadas duas resinas distintas: uma resina acrílica, que resulta num material polimérico rígido, e um fotopolímero que, no fim do processo produtivo, tem características similares a um material elastomérico, mais maleável e menos duro.

Tabela 4.11: Características do equipamento de *material jetting* usado para a fabricação da marca estipulada

Características da Máquina	
Volume máximo de trabalho [mm^3]	$294 \times 192 \times 148.6$
Espessura de secção [μm]	-
Tolerância [mm]	0.1
Espessura de camada [μm]	16 - 28

Tabela 4.12: Características mecânicas dos polímeros fabricados pelo processo de *material jetting*

Características do Material	Polímero rígido	Polímero flexível
Modulo de <i>Young</i> [GPa]	2 - 3	-
Dureza <i>Shore A</i>	-	85
Tensão de rotura [MPa]	50 - 65	3 - 5
Alongamento após rotura [%deformação]	10 - 25	45 - 55

Tal como para o processo de impressão a fogo, resumiu-se as soluções de material-processo-máquina para a marcação a tinta, que vão ser analisadas nos capítulos seguintes, na tabela 4.13.

Tabela 4.13: Tabela resumo das soluções de material-processo-máquina encontradas para a marcação a tinta

Processo de Fabrico	Fabricação de Placas Flexográficas	Estereolitografia	<i>Material Jetting</i>
Empresa / Equipamento	E	<i>Form 2</i>	F
Conceito Produtivo	Fotopolimerização		
Processos Adicionais	Lavagem, secagem e pós-processamento	Pós-processamento	-
Material Fabricado	Acrilato de poliuretano	<i>Clear Resin</i>	Polímero rígido Polímero flexível
Área [mm^2]/Volume de trabalho [mm^3]	350×500	$145 \times 145 \times 175$	$294 \times 192 \times 148.6$

4.4 Testes Realizados

A validação das marcas fabricadas pelas soluções apresentadas anteriormente, depende em grande parte, da qualidade da marcação realizada. Esta verificação, apesar de subjetiva, é efetuada tendo em conta a experiência e conhecimento dos operários em controlo da marcação. A adicionar a esta comparação visual, verificou-se interessante estudar outras variantes que pudessem beneficiar o processo de marcação. Os testes efetuados podem ser resumidos da seguinte forma:

Marcação a Fogo

- Validar a qualidade da marcação;
- Analisar diferenças na marcação por um carimbo com e sem retificação superficial;
- Testar a possibilidade de redução da altura da zona de marcação.

Marcação a Tinta

- Validar a qualidade da marcação,
- Verificar se há desgaste do carimbo na marcação de grandes quantidades.

4.4.1 Testes de Avaliação

No caso da marcação a tinta, devido à natureza mais frágil dos materiais utilizados, estabeleceu-se como importante a realização de testes de durabilidade da marca. Estes testes consistem na verificação da existência de degradação da marca e/ou perda de qualidade na marcação realizada de grandes quantidades de rolhas. Para isto, definiu-se a quantidade de 50000 rolhas como valor mínimo necessário para produção sem desgaste da marca.

Nos processos de *powder bed fusion*, dos quais a fusão seletiva a laser faz parte, é possível atingir rugosidades de superfície muito precisas demonstrado pela tabela 2.6. No entanto, é normal a utilização de técnicas de granalhagem, com um custo adicional, por forma a melhorar a qualidade da superfície das peças. Visto isto e tendo em conta que pode influenciar a qualidade da marcação, objetivou-se investigar a diferença entre uma rolha marcada por um carimbo sem qualquer processo de pós-processamento e de um com a superfície de marcação posteriormente retificada.

4.4.2 Testes Complementares

Segundo o desenho de construção da figura D.1, desenvolvido em conformidade com as marcas originais solicitadas pela empresa, a altura da zona de marcação, ou altura do carimbo, está estabelecida como 2[mm]. Este valor está definido por forma a que, no ato de marcação, não haja contacto entre a rolha e a base do carimbo que suporta a imagem de impressão.

Tanto para a fabricação das marcas por gravação a laser como para a fusão seletiva, a diminuição deste valor é benéfico na medida em que pode reduzir consideravelmente os custos e tempo de fabricação em ambos os casos e, de forma direta, o custo de material no caso do SLM. Desta forma, pretendeu-se avaliar a possibilidade da diminuição da altura do carimbo com o teste de marcas com 1.0, 1.5 e 1.8[mm] de altura de marcação.

4.5 Software Auxiliar

O procedimento industrial relativo à aquisição dos carimbos para a marcação de rolhas, já explicitado no capítulo 3, é iniciado com a obtenção do *design* que se pretende marcar, procedente

do cliente. No caso da empresa onde se realizou esta dissertação, pode-se depreender que o seu único contacto com o processo de produção, consiste na realização de pequenos ajustes aos *designs* a remeter ao fornecedor.

Como o objetivo do projeto pretende a implementação de uma nova área de produção dentro da empresa, verificou-se como necessário ponderar acerca do desenvolvimento de um setor de manuseamento de imagem e conceção das respetivas marcas. Visto que, dentro das 5 hipóteses estabelecidas, 3 dos processos são subtipos de fabrico aditivo, os quais carecem da modelação digital dos vários *designs*, considerou-se a possibilidade da elaboração de um *software* que permitisse agilizar e facilitar esta etapa da produção.

Entrou-se em contacto com uma outra entidade empresarial, com o propósito de desenvolver um programa auxiliar para o processo de modelação de carimbos de marcação. Estipulou-se como objetivos, a conceção de um ficheiro *.stl* (admissível pela maioria das máquinas de FA) do carimbo a fabricar, tendo como *input* o seu *design* e dimensões pretendidas. A criação desta ferramenta, possibilitaria automatizar o processo exaustivo de modelação das marcas, bem como agilizar e acelerar o tempo necessário à sua produção.

4.6 Análise de Investimento

Depois de se obter os resultados da produção, marcação e dos testes realizados, pretende-se ainda efetuar uma análise económica para verificar o período de recuperação e, posteriormente, tendo em conta toda a informação, concluir com a escolha do conjunto material-processo-máquina a partir da metodologia de escolha AHP.

4.6.1 Período de Recuperação

Como já foi referido no capítulo 3, o valor do investimento está dependente da margem de custo (M) que se consegue obter para cada tipo de marca. No entanto, visto que, no que toca à marcação a fogo, só se explorou os custos e tempos de produção referentes às marcas corpo, verificou-se necessário estimar estes valores para os códigos e marcas topo. Uma vez que estes fatores de produção estão diretamente relacionados à área e volume dos objetos a fabricar, obteve-se a razão média entre os volumes dos códigos (V_c) e marcas topo (V_{mt}) em relação ao da marca corpo (V_{mc}) a partir dos desenhos técnicos dos anexos E e da figura D.1:

$$\frac{V_c}{V_{mc}} = 0.01 \quad (4.1)$$

$$\frac{V_{mt}}{V_{mc}} = 0.27 \quad (4.2)$$

Através destes valores, pode-se estimar os seus preços de fabricação em relação à marca corpo. Adicionando-se a possibilidade de estimar a cadência de produção a partir da relação entre as áreas das superfícies de trabalho de cada equipamento com as áreas funcionais de cada carimbo, obtém-se os dados necessários para averiguar o período de recuperação.

Para que seja possível realizar uma análise de investimento e, ao mesmo tempo, manter a confidencialidade de informação da empresa, os dados referentes aos custos de produção das marcas (C_f), segundo os processos mencionados neste capítulo, serão indicados em relação ao preço médio original (C_o). Por outras palavras, se, por exemplo, se conseguir uma redução do preço de obtenção de uma marca corpo em metade, este novo valor ($C_{f(mc)}$) estará sob a forma:

$$C_{f(mc)} = 0.5 \cdot C_{o(mc)} \quad (4.3)$$

Desta forma, e considerando que o número de marcas necessárias se mantém idêntico ao do ano 2018, denotado na tabela 3.1, é possível calcular o período de recuperação, em anos, para o investimento nas soluções encontradas.

4.6.2 Analytical Hierarchy Process (AHP)

Para concluir acerca da melhor solução a investir, tendo em conta todas as variáveis estipuladas, decidiu-se aplicar a metodologia de classificação *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Para a sua resolução, é necessário estabelecer e pesar os vários fatores de comparação da aplicação em causa. Neste caso, tal como explicitado no esquema da figura 4.8, estabeleceu-se o período de recuperação (PR), a qualidade da marcação (QM) e a flexibilidade produtiva (FP) como os principais fatores intervenientes na decisão. Subdividiu-se ainda a flexibilidade produtiva na necessidade de pós-processamento (NPP), mão-de-obra (MO) e cadência de produção (CP).

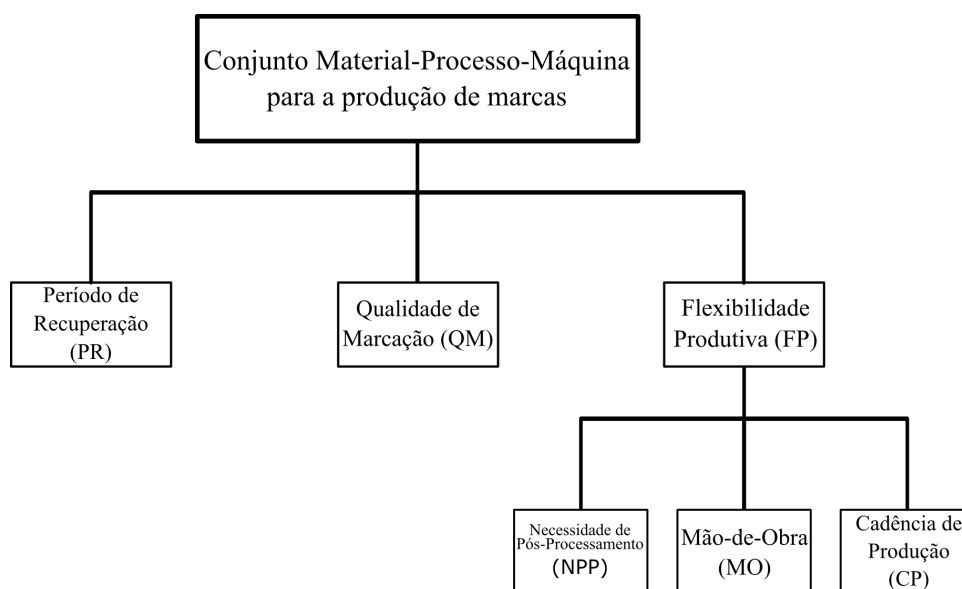


Figura 4.8: Esquema hierárquico dos fatores de comparação estabelecidas para o projeto.

A definição das prioridades, ou peso de cada fator, em relação aos restantes, foi realizada tendo em conta os objetivos do projeto e a sua importância para a empresa. As tabelas 4.14 e 4.15 apresentam as matrizes de decisão a ser usadas, com os respetivos índices de preferência.

Tabela 4.14: Matriz de preferência entre os fatores principais de decisão do projeto

Fatores Principais de Decisão				
Fatores	PR	QM	FP	Preferência
PR	1	4	3	0.61
QM	1/4	1	1/2	0.13
FP	1/3	2	1	0.26

Tabela 4.15: Matriz de preferência entre os fatores de decisão particulares para a flexibilidade produtiva (FP)

Fatores Secundários de Decisão				
Fatores	NPP	MO	CP	Preferência
NPP	1	1/3	1/5	0.11
MO	3	1	1/2	0.32
CP	5	2	1	0.57

Desta forma, e com a adição das matrizes de preferência entre as várias soluções material-processo-máquina para cada fator, assente nos resultados obtidos, concluir-se-há, analiticamente, onde o investimento é mais benéfico.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

Este capítulo pretende evidenciar os resultados obtidos ao longo do decorrer do projeto, tendo em conta os vários processos, equipamentos, materiais e os testes especificados anteriormente. Apresenta-se também o resultado do desenvolvimento do *software*, mostrando as suas funcionalidades.

As várias soluções são analisadas e comparadas, considerando os resultados obtidos, de acordo com o tipo de marcação onde se inserem. De seguida, determinam-se os tempos estimados de recuperação do investimento, para cada uma das soluções. Por último, aplicando a metodologia de decisão analítica hierárquica (AHP), verifica-se qual a solução ótima para cada caso.

5.1 Processos de Fabrico e Marcação

A análise dos resultados obtidos para a fabricação e aplicação das marcas obtidas vai estar assente em 4 fatores:

- Reprodução fidedigna do carimbo convencionado para cada método de marcação;
- Qualidade da marcação em rolhas;
- Processo com cadência de produção apropriada para o projeto;
- Diminuição do custo de obtenção/produção das marcas,

onde a falha num destes pontos excluirá o respetivo conjunto material-processo-máquina da sua análise posterior.

Para além disto, vão ser feitas observações aos vários testes realizados, por forma a avaliar as diferenças entre a utilização dos novos processos em relação aos originais (testes de avaliação) e como poderiam ser melhorados (testes complementares).

5.1.1 Marcação a Fogo

Dentro das 4 empresas contactadas (A, B, C e D), foram fabricadas cinco carimbos para teste. A figura 5.1 apresenta os resultados dos carimbos produzidos por cada empresa e salienta as respectivas zonas de maior detalhe. Na figura 5.2 observou-se, ao microscópio, alguns destes detalhes. Em ambas as figuras, as letras representam as respectivas empresas onde a marca foi fabricada e “Int” e “Híb” o método de produção: integral e híbrida, respetivamente.



Figura 5.1: Carimbos para marcação a fogo produzidos pelas várias empresas, com destaque na zona mais detalhada.

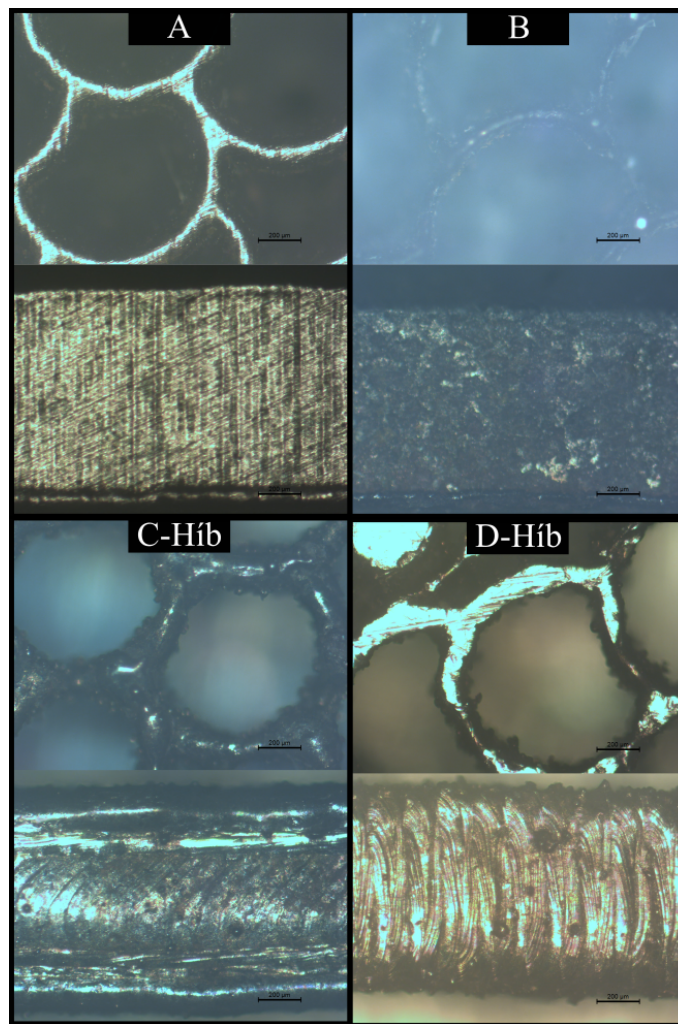


Figura 5.2: Imagem microscópica dos detalhes das marcas fogo com uma ampliação de 75x.

Ambos os processos foram capazes de reproduzir o *design* estipulado. Em termos da qualidade de imagem e de rugosidade superficial, a gravação a laser permitiu obter melhores resultados qualitativos. Na marca da empresa A, o *design* não apresenta qualquer defeito ou diferença do definido. No caso da fusão seletiva a laser, as partes fabricadas possuem uma rugosidade superficial notável ao tato e com partes do *design* não tão perceptíveis como no caso anterior, devido à sua fusão. Não obstante, dentro das três peças fabricadas por SLM, a marca com melhor qualidade de produção foi a da empresa D.

Verificou-se, no entanto, uma impossibilidade por parte das empresas de gravação a laser, na produção exata da peça modelada. Os 2[mm] estipulados para a altura da zona de marcação não foram cumpridos, devido aos elevados tempos de fabricação que implicavam. No SLM, não existiu qualquer problema de fabricação, pelo que os modelos dispõem das dimensões pretendidas.

Para os testes de marcação de rolhas, com exceção à empresa A, todas as marcas foram testadas. Isto deveu-se ao facto desta marca ter sido realizada numa placa plana com espessura reduzida, impossibilitando o seu teste. Foram marcadas aproximadamente 10 rolhas para cada

carimbo à temperatura de 550°C onde, na figura 5.3, se encontra um exemplar representativo dos resultados das respetivas marcações.



Figura 5.3: Rolhas carimbadas pelas marcas produzidas por cada empresa para a marcação a fogo.

Obteve-se, em todos os casos testados, uma boa qualidade de marcação, especialmente para a marca da empresa D onde as zonas de maior complexidade se encontram mais nítidas. No entanto, no caso da marca realizada por gravação a laser (empresa B), apesar do *design* estar compreensível, verifica-se que houve contacto da rolha com a base do carimbo. Isto é, muito provavelmente, devido ao facto de esta marca possuir apenas 1 [mm] de altura da zona de marcação em vez dos 2 [mm] estipulados pelo desenho de construção.

Na tabela 5.1 encontra-se a informação referente ao custo e cadência de produção de marcas por dia, para cada empresa/método de fabricação. Estes valores são estimados com base nos dados fornecidos pelas empresas para cada caso.

Tabela 5.1: Dados estimados de custo e cadência de produção referentes à fabricação de carimbos, para marcação a fogo, pelas várias empresas

Empresa	Tipo de Produção	Cadência diária [marcas]	Custo de produção (C_f)
A	-	1.7	$0.09 \cdot C_{o(mc)}$
B	-	0.8	$0.09 \cdot C_{o(mc)}$
C	Integral	15	$0.16 \cdot C_{o(mc)}$
	Híbrida	90	$0.11 \cdot C_{o(mc)}$
D	Híbrida	8	$0.19 \cdot C_{o(mc)}$

Através da observação destes resultados, verifica-se que a fabricação de marcas por gravação laser é consideravelmente mais morosa que por SLM. Em relação a este último, a produção híbrida revelou uma redução considerável no custo de produção e um aumento na cadência de produção, sendo, portanto, uma melhor alternativa. Em geral, e segundo os preços estimados, verifica-se uma redução acentuada entre o custo de obtenção destas peças pelo método original e o seu custo de produção por ambos os métodos estudados.

Analisando os resultados de custo de produção para as variedades híbridas, nota-se que este valor é superior para o equipamento da empresa D apesar da quantidade de material adicionado ser idêntica. Isto deve-se ao facto do equipamento ter um volume de trabalho mais pequeno e, por isso, os gastos em consumíveis (principalmente gás inerte) por peça são acrescidos.

5.1.2 Marcação a Tinta

Na figura 5.4, apresenta-se os resultados das marcas produzidas para a impressão a tinta, com ênfase na zona de maior complexidade, e a sua fixação no cunho de marcação. No caso da estereolitografia e do polímero rígido fabricado por *material jetting*, foi necessário alterar a sua forma de uma base plana para uma curva. Isto foi realizado pressionando-as contra um cunho de marcação num ambiente de temperatura elevada, permitindo a sua deformação plástica. Observou-se alguns pormenores ao microscópio presentes na figura 5.5. Analogamente aos resultados da marcação a fogo, as letras nas imagens são referentes às empresas onde foram fabricadas, com exceção da estereolitografia, fabricada no equipamento *Form 2*. O “Rig” e “Flex” representam o material polimérico rígido e flexível, respetivamente, da fabricação pelo processo de *material jetting*.

Os resultados dos testes de marcação destes carimbos estão retratados na figura 5.6, no entanto, devido à quebra da peça fabricada por estereolitografia no processo de dobragem, não foi possível testá-la.

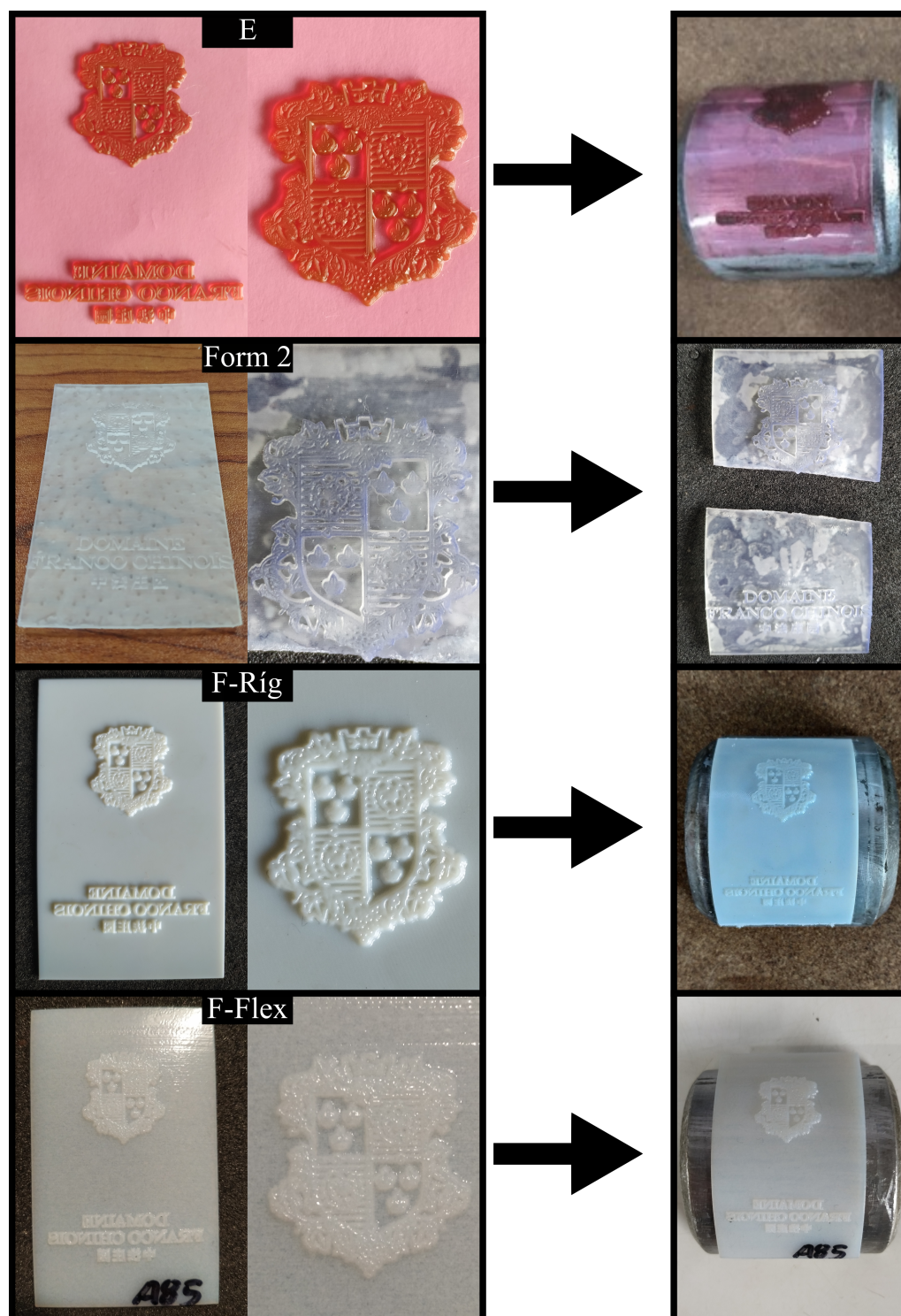


Figura 5.4: Carimbos para marcação a tinta produzidos pelas várias empresas, com destaque na zona mais detalhada e sua aplicação no cunho de marcação.

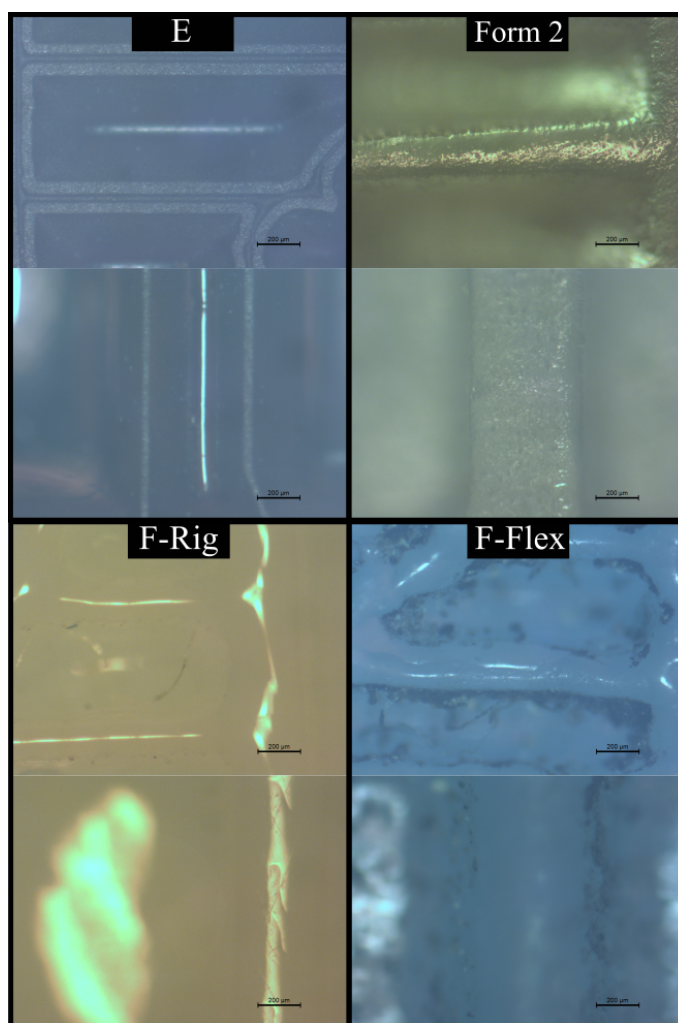


Figura 5.5: Imagem microscópica dos detalhes das marcas tinta com uma ampliação de 75x.



Figura 5.6: Rolhas carimbadas pelas marcas produzidas por cada empresa para a marcação a tinta.

Na reprodução do *design* na marca, a placa flexográfica e o polímero fabricado por estereolitografia foram os que tiveram os melhores resultados. Por contrapartida, no *material jetting*, verifica-se uma redução na definição da imagem impressa. Este último resultado, já era esperado visto que, pelo *software GRANTA EduPack 2020*, a espessura de secção mínima era maior do que a estipulada.

Com as rolhas testadas, observou-se uma maior qualidade de impressão por parte da placa flexográfica e idêntica entre as duas variantes de *material jetting* mas consideraram-se as três com qualidade válida para a aplicação.

A tabela 5.2 apresenta os dados referentes à cadência e custo de produção das marcas segundo as soluções encontradas. São, da mesma forma que para a marcação a fogo, valores estimados com base na informação da produção, fornecida pelas empresas.

Tabela 5.2: Dados estimados de custo e cadência de produção referentes à fabricação de carimbos, para marcação a tinta, pelas várias empresas

Empresa/Equipamento	Material	Cadência diária [marcas]	Custo de produção (C_f)
E	Acrilato de poliuretano	280	$0.13 \cdot C_{o(t)}$
Form 2	Clear Resin	10	$0.09 \cdot C_{o(t)}$
F	Polímero rígido	94	$0.20 \cdot C_{o(t)}$
	Polímero flexível	94	$0.25 \cdot C_{o(t)}$

Os resultados demonstraram uma redução significativa no custo de produção em relação ao

método de fabricação original, sendo o processo de estereolitografia o que apresenta a maior diferença. Em termos produtivos, ambos os equipamentos das empresas E e F apresentam cadência diária suficiente para o projeto, o que não acontece com a *Form 2*. Para este último, pode-se afirmar que, por ser uma máquina mais indicada para um ambiente doméstico, o seu valor não pode ser comparado com os outros dois. No entanto, tanto o tempo de produção como a necessidade adicional de pós-processamento inerente ao processo, torna a sua utilização mais inflexível. Dentro do processo de *material jetting*, o custo de produção é mais elevado para o polímero flexível. Contudo, o facto de não ser necessário curvar a marca, beneficia a agilização do prazo de preparação destas.

5.1.3 Testes Realizados

Os resultados dos testes que se propuseram realizar, divididos em testes de avaliação e complementares, estão apresentados nas figuras seguintes. As figuras 5.7 e 5.8 demonstram o efeito da marcação de 10, 20 e 50 mil rolhas com o carimbo fabricado pelo processo flexográfico e a marca rígida do *material jetting*, respetivamente, para averiguar possíveis variações na marcação.



Figura 5.7: Teste de desgaste de marca fabricada pelo processo flexográfico com exemplares de rolhas próximas das 10000, 20000 e 50000 marcações.

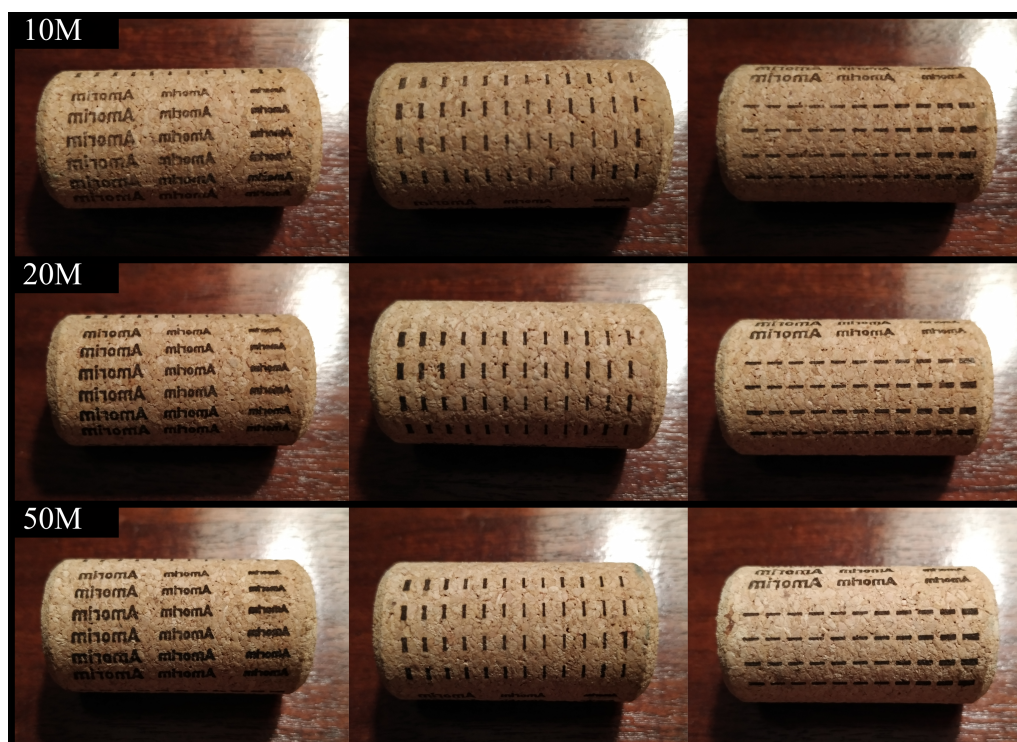


Figura 5.8: Teste de desgaste da marca rígida fabricada por *material jetting* com exemplares de rolhas próximas das 10000, 20000 e 50000 marcações.

Os testes refletiram que não existe qualquer desgaste ou distinção na marcação para 10000, 20000 ou 50000 rolhas pelo que se pode conferir a viabilidade da sua utilização em grandes produções.

Dentro ainda dos testes de avaliação, a figura 5.9 apresenta uma amostra dos resultados de marcação a partir de um carimbo de SLM com a superfície retificada. Evidencia-se uma marcação com qualidade similar ou até inferior à de carimbos não retificados pelo que se descartou a sua necessidade.



Figura 5.9: Teste de marcação em rolhas com marca retificada.

Os resultados do teste complementar, que consiste na diminuição da altura da zona de marcação dos carimbos, estão apresentados na figura 5.10. As marcas foram desbastadas com o auxílio de uma fresadora manual, até se chegar a uma altura de 1.8 e 1.5[mm]. A análise da altura de marcação de 1[mm] foi fundamentada nos resultados da marca produzida pela empresa B, fabricada

com este valor de profundidade.



Figura 5.10: Teste de marcação em rolhas com altura da zona de marcação de 1.8 e 1.5[mm].

Verificou-se que, nos primeiros dois casos, apesar de uma perda de definição devido ao processo de desbaste, não houve qualquer problema na marcação, contrariamente ao resultado observado com o carimbo da empresa B. Com isto, pode-se assumir a possibilidade de fabricação de marcas com uma altura de marcação reduzida a 1.5[mm], abatendo em tempos de fabricação e, no caso específico da fusão seletiva a laser, reduzir diretamente no custo de utilização de material.

5.2 Software Auxiliar

O *software* desenvolvido pela empresa contactada tem um funcionamento resumido no esquema da figura 5.11. Inicialmente, o *design* vindo do cliente é trabalhado para ficar em formato *bitmap*, onde a cor branca representa o que se pretende marcar e a cor preta o resto do carimbo. De seguida, o ficheiro é importado para o software onde se inserem as dimensões pretendidas para a marca (largura, comprimento, espessura da base e espessura do carimbo). Conclui-se com a criação do ficheiro *.stl*, que é suportado pela maioria dos equipamentos de fabrico aditivo.

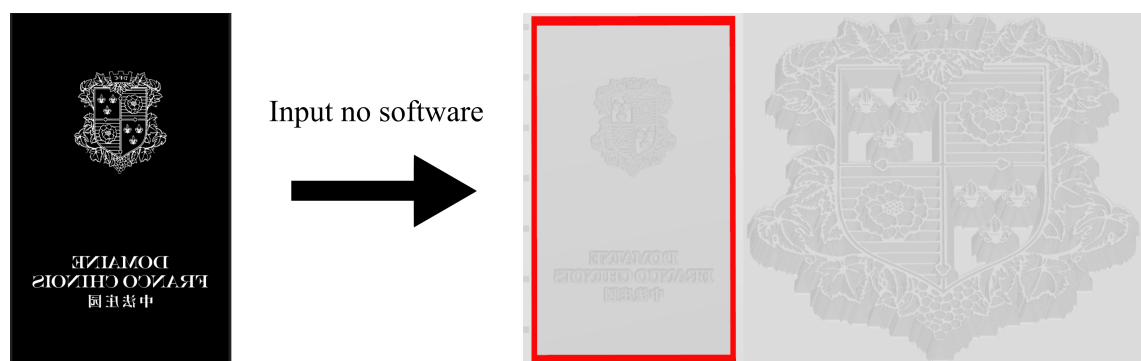


Figura 5.11: Esquema resumido do processo de modelação automática do *software* auxiliar.

O desenvolvimento do *software* permitiu agilizar a modelação dos carimbos para a sua consecutiva aplicabilidade em processos de fabrico aditivo. O programa foi realizado especificamente para marcas com uma base plana retangular, característico dos carimbos para marcação a tinta, no entanto, ao considerar-se a possibilidade do fabrico híbrido em SLM para a marcação a fogo, este *software* ganha um valor acrescido.

5.3 Período de Recuperação do Investimento

No cálculo do período de recuperação, excluíram-se as soluções onde não foi possível realizar testes de marcação ou onde o seu resultado não foi adequado. Estão incluídos neste grupo as soluções de gravação a laser e de estereolitografia.

Primeiramente, para a marcação por indução, realizou-se o cálculo estimado do custo e cadência de produção de códigos e marcas topo, de acordo com as relações entre áreas e volumes estipulados no capítulo anterior, resultando na tabela 5.3.

Tabela 5.3: Dados estimados de custo e cadência de produção referentes à fabricação dos três tipos de carimbos existentes na marcação a fogo, pelas várias empresas

Empresa	Tipo de Produção	Tipologia da Marca	Cadência diária [marcas]	Custo de produção (C_f)
C	Integral	Corpo	15	$0.16 \cdot C_{o(mc)}$
		Código	629	$0.01 \cdot C_{o(c)}$
		Topo	97	$0.06 \cdot C_{o(mt)}$
	Híbrido	Corpo	90	$0.11 \cdot C_{o(mc)}$
		Código	3775	$0.04 \cdot C_{o(c)}$
		Topo	586	$0.09 \cdot C_{o(mt)}$
D	Híbrido	Corpo	8	$0.19 \cdot C_{o(mc)}$
		Código	823	$0.04 \cdot C_{o(c)}$
		Topo	128	$0.10 \cdot C_{o(mt)}$

Comparando estes resultados com as necessidades de marcas e os seus custos de obtenção originais estipulados pelo projeto, verifica-se que todas as soluções apresentadas têm a cadência necessária e custos de fabricação reduzidos.

Analisando os dados referentes à produção integral e híbrida, segundo a empresa C, verifica-se que o fabrico híbrido distingue-se pelas elevadas cadências de produção. No entanto, apesar de haver uma redução no custo das marcas corpo, da produção integral para a híbrida, no caso dos códigos e das marcas topo verifica-se exatamente o contrário. Isto é devido ao volume reduzido de material que perfaz as pré-formas utilizadas na produção híbrida. Isto estabelece com que o seu custo de obtenção e maquinaria para a pré-forma seja superior ao custo de pó metálico consumido para a sua fabricação por SLM.

Para os dados estimados na produção pelo equipamento da empresa D, em relação à empresa C com produção híbrida, pode-se verificar o mesmo aspeto referente ao acréscimo de custo de fabrico devido aos consumíveis (nas marcas topo: $0.09 \cdot C_{o(mt)}$ para $0.10 \cdot C_{o(mt)}$). Este acréscimo

é menos notável, ou quase inexistente, para os códigos e marcas topo visto que estes gastos são repartidos por um maior número de marcas.

O *payback* ou período de recuperação (PR) pode então ser calculado considerando uma necessidade de marcas anual (N) idênticas às do ano de 2018, a margem de custo por peça ($M = C_o - C_f$) e o custo necessário para cada investimento (CI), realizou-se a tabela 5.4 onde se obtém este resultado, em anos, para cada solução considerada.

Tabela 5.4: Valores estimados de *payback* do investimento nas soluções consideradas

Variante de Marcação	Empresa	Tipo de Produção / Material	Período de Recuperação (PR)[anos]
Marcação a Fogo	C	Integral	2.14
		Híbrido	2.21
	D	Híbrido	1.59
Marcação a Tinta	E	Acrilato de poliuretano	0.47
	F	Polímero rígido	0.59
		Polímero flexível	0.95

Observa-se que, nos resultados para a marcação a fogo, apesar dos custos de produção da empresa C serem mais reduzidos em comparação com a empresa D, o período de recuperação é maior. Isto deve-se a um custo de investimento (CI) mais elevado no primeiro caso onde, apesar da margem (M) ser maior, não é possível obter um período de recuperação menor que 2 anos.

Para a marcação a tinta, todas as soluções estão dentro do período de recuperação estipulado. A empresa E, que compreende a produção de placas flexográficas é a que tem a recuperação mais pequena, seguido da fabricação do polímero rígido e do flexível por *material jetting*, respetivamente. Neste caso, estas relações estão de acordo com os custos de produção (C_f) obtidos.

5.4 Processo de Decisão Analítica Hierárquica

Para finalizar com o processo de escolha, aplicou-se a metodologia AHP. Em função dos resultados obtidos, realizou-se as matrizes de comparação, apresentadas no anexo G, para cada parâmetro estabelecido, comparando as soluções analisadas em função do seu tipo de marcação (fogo ou tinta). Com base nos pesos determinados para cada parâmetro e nos índices de preferência estabelecidos no capítulo anterior, os resultados finais estão apresentados nas tabelas 5.5 e 5.6 para a marcação a fogo e tinta, respetivamente.

Tabela 5.5: Resultados finais de preferência para cada solução da marcação a fogo

Valor Final de Preferência				
Empresa	PR	QM	FP	Total
C-Int	0.15	0.04	0.07	0.26
C-Hib	0.08	0.04	0.15	0.26
D-Hib	0.35	0.08	0.06	0.48

Tabela 5.6: Resultados finais de preferência para cada solução da marcação a tinta

Valor Final de Preferência				
Empresa	PR	QM	FP	Total
E	0.30	0.08	0.11	0.49
F-Rig	0.18	0.04	0.07	0.28
F-Flex	0.09	0.04	0.10	0.23

Segundo este método analítico, dentro das soluções estudadas, os conjuntos material-processo-máquina da empresa D e da empresa E são os mais indicados para investir na marcação a fogo e tinta.

Em ambos os casos, verifica-se que o fator do período de recuperação (PR) é chave na decisão final. Dado que a empresa D é a única, na marcação a fogo, que atinge a meta de um *payback* inferior a 2 anos, a sua preferência neste fator, em relação aos outros, é muito superior. Para a marcação a tinta, esta preferência não é tão acentuada, no entanto, é suficiente para perfazer quase um terço da pontuação total. É também, nestas duas soluções, onde se verificou uma melhor qualidade de marcação (QM), correspondente aos 0.08 valores em relação aos 0.04 dos outros casos.

No que toca à flexibilidade produtiva (FP), a cadência de produção (CP) é o fator dominante, em comparação à necessidade de pós-processamento (PP) e mão-de-obra (MO), pelo que se observa, na tabela de decisão final, os valores de 0.15 e 0.11 para as empresas C (com produção híbrida) e E na marcação a fogo e tinta, respetivamente.

Capítulo 6

Conclusão

Esta dissertação focou-se, em grande parte, no estudo e análise da viabilidade da aplicação de novas soluções de materiais e processos de fabrico, na produção de carimbos, para a marcação de rolhas de cortiça. Para isto, foram aplicadas metodologias e realizados testes dos quais se auferiu várias conclusões ao longo do seu desenvolvimento.

A partir da avaliação das várias tipologias de marcas em cada processo e o estudo do seu funcionamento em ambos os processos, foi possível identificar os requisitos inerentes a cada tipo de marcação. Desta forma e adaptando a metodologia de seleção de materiais e processos de fabrico aditivo às características do projeto em estudo, limitou-se e hierarquizou-se o número de soluções possíveis.

Para a marcação a fogo, o aço inoxidável verificou ser a melhor solução de material, na medida em que cumpre com os requisitos de temperatura de serviço máxima ($T_{smax} \geq 700[^\circ C]$) e condutividade térmica ($k \geq 10[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}]$) estipulados e é o material que melhor otimiza o processo (com o maior índice $\frac{k}{\epsilon/kg}$). Na marcação a tinta, os resultados da metodologia de seleção, assinalaram os polímeros como a família de materiais mais indicada para o problema em causa. Neste caso, os requisitos foram em função do módulo de *Young* ($1 \leq E \leq 100[GPa]$), da tensão limite de elasticidade ($\sigma_e \geq 20[MPa]$) e da sua resistência aos componentes da tinta de marcação. O critério de otimização escolhido teve em conta os dois primeiros ($\frac{\sigma_e}{E \cdot (\epsilon/kg)}$).

Relativamente aos processos de fabrico, e em concordância com os resultados de materiais, a gravação a laser e a fusão seletiva a laser, foram as selecionadas para a marcação a fogo e a estereolitografia para a marcação a tinta. Em função das condições locais e disponibilidade para teste, o processo de fabricação de placas flexográficas e o processo de fabrico aditivo por *material jetting* também foram analisados neste tipo de marcação.

Os resultados dos testes e da informação referente à produção das marcas, evidenciou a fusão seletiva a laser, as placas flexográficas e o *material jetting* como soluções produtivamente e economicamente viáveis. A impossibilidade de teste da marca rígida fabricada por estereolitografia e a baixa cadência produtiva do processo de gravação a laser, inviabilizaram a sua aplicabilidade e foram, portanto, excluídas de posterior análise.

Os testes adicionais refletiram que não existe desgaste ou qualquer defeito visível na marcação

de grandes quantidades de rolhas a partir da marca da placa flexográfica e da marca rígida fabricada por *material jetting*. A retificação superficial da marca fabricada por SLM não trouxe qualquer benefício em termos de qualidade de marcação e a redução da altura da zona de marcação de 2[mm] para 1.5[mm] não condiciona a gravação da rolha, pelo que poderá ser uma boa opção para reduzir o tempo e custo de produção do processo.

O *software* auxiliar desenvolvido, revelou-se pertinente na automatização do processo de modelação de carimbos de geometria retangular, principalmente para a marcação a tinta, terminando com a exportação de um ficheiro *.stl*, universal à maioria dos processos de fabrico aditivo.

Na análise dos custos de produção concluiu-se que, apesar da produção SLM do tipo híbrida, compensar em termos de tempo e custo de fabrico para as marcas corpo, o valor monetário por unidade é menor, na produção integral, para os códigos e marcas topo. Isto deve-se ao facto do volume da pré-forma ser menor nestes dois casos e, portanto, o seu custo de fabricação por SLM é menor que o respetivo custo de obtenção e maquinaria para realização das pré-formas.

Tendo em conta o período de recuperação de 2 anos, definido como objetivo específico do projeto, na marcação a fogo, o equipamento com menor cadência de produção (da empresa D) foi o único a alcançar essa meta. Para a marcação a tinta, todos os períodos de retorno foram inferiores a 1 ano, com o melhor resultado para o processo de produção de placas flexográficas (equipamento da empresa E).

Com a aplicação da metodologia de decisão analítica hierárquica (AHP), as soluções material-processo-máquina com maior valor de preferência global, dentro das analisadas, foram o aço inoxidável pelo processo de fusão seletiva a laser (SLM) segundo o equipamento da empresa D, para a marcação a fogo, e a utilização do polímero elastomérico, acrilato de poliuretano, pelo processo de fotopolimerização de placas flexográficas, associado à empresa E. A importância atribuída ao fator do período de recuperação (PR) em relação aos outros fatores de decisão, foi a principal razão dos valores de preferência finais calculados.

6.1 Perspetivas de Trabalho Futuro

Tendo em conta as conclusões que emergiram do projeto, pode-se ainda referir alguns elementos que se consideram importantes para complementar e dar continuidade ao estudo realizado:

No desenvolvimento do projeto, foram considerados os equipamentos disponibilizados pelas empresas para a avaliação da cadência, custos e cálculo do período de recuperação, no entanto, uma pesquisa mais aprofundada a outras empresas e variedades de maquinaria disponível seria o próximo passo para otimizar o processo.

Visto que a análise de investimento foi realizada com base num critério contabilístico (período de retorno), que ignora o valor temporal do dinheiro, seria uma mais valia para a empresa fazer um estudo de investimento com base num critério de decisão com atualização dos *cash-flows*.

No que toca à produção por fusão seletiva a laser (SLM), propõe-se validar as estimativas feitas para o custo e cadência produtiva de códigos e marcas topo, para avaliar a sua viabilidade de produção. Para além disto, tendo em conta que o tipo de produção integral destas marcas é menos

oneroso que a produção híbrida, poderia-se estudar o tipo de produção otimizada, possível neste tipo de fabrico aditivo, em relação às duas já testadas.

Numa componente mais ecológica e talvez economicamente mais viável, poderia-se averiguar a possibilidade de reutilização de marcas descontinuadas, como pré-formas, para o fabrico aditivo e normalizar as dimensões das bases dos carimbos de marcação por forma a simplificar todo o processo.

Por último, seria importante dar continuidade ao desenvolvimento do *software* auxiliar, possibilitando a sua inserção em todos os processos e tipologias da marcação, com o objetivo de automatizar e simplificar o processo de tratamento e manipulação dos *designs* fornecidos pelos clientes.

Bibliografia

- Aços, R. (2017). Produtos, Aços e Ligas, Aços Inoxidáveis e Refractários, R 316. https://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-inoxida-alveis-e-refracta-alrios/r-316_.html. Last checked on 05/02, 2021.
- Aços, R. (2018). Catalogo de produtos e serviços.
- Adeyemi, A., Akinlabi, E. T., and Mahamood, R. M. (2018). Powder bed based laser additive manufacturing process of stainless steel: A review. *Materials Today: Proceedings*, 5(9):18510–18517.
- Alghamdy, M., Ahmad, R., and Alsayyed, B. (2019). Material selection methodology for additive manufacturing applications. *Procedia CIRP*, 84:486–490.
- Amorim (2014). About Amorim. *Amorim*, page 2.
- APCOR (2018a). Cortiça, O que é? <https://www.apcor.pt/cortica/o-que-e/>. Last checked on 05/02, 2021.
- APCOR (2018b). Cortiça, percurso industrial, rolhas naturais. <https://www.apcor.pt/cortica/processo-de-transformacao/percurso-industrial/rolhas-naturais/>. Last checked on 05/02, 2021.
- APCOR (2018c). Cortiça, Percurso Industrial. <http://www.apcor.pt/cortica/processo-de-transformacao/percurso-industrial/>. Last checked on 05/02, 2021.
- Ashby, M. F. (2011). Chapter 5 - materials selection—the basics. In Ashby, M. F., editor, *Materials Selection in Mechanical Design (Fourth Edition)*, pages 97 – 124. Butterworth-Heinemann, Oxford, fourth edition edition.
- Brites, F., Malça, C., Gaspar, F., Horta, J. F., Franco, M. C., Biscaia, S., and Mateus, A. (2017). Cork Plastic Composite Optimization for 3D Printing Applications. *Procedia Manufacturing*, 12(December 2016):156–165.
- Çakır, O. (2019). Chemical machining of ST37 rod using etchant substance FeCl₃. *Acta Physica Polonica A*, 135(4):583–585.
- Corticeira Amorim (2015). About cork stoppers.
- Corticeira Amorim, S.G.P.S., S. (2020). Relatório Anual Consolidado 2019.
- Czelusniak, T., Higa, C. F., Torres, R. D., Laurindo, C. A. H., de Paiva Júnior, J. M. F., Lohrengel, A., and Amorim, F. L. (2019). Materials used for sinking EDM electrodes: a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(1):1–25.

- Dhakar, K., Dandekar, M., and Tyagi, M. (2020). Advances in electrical discharge machining: State-of-the-art. In Sharma, V. S., Dixit, U. S., Sørby, K., Bhardwaj, A., and Trehan, R., editors, *Manufacturing Engineering*, pages 245–254, Singapore. Springer Singapore.
- Duda, T. and Raghavan, L. V. (2016). 3D Metal Printing Technology. *IFAC-PapersOnLine*, 49(29):103–110.
- Formallabs (2017). Materials for rapid prototyping. *Material data sheet standard*, pages 4–6.
- Formlabs (2019). Formlabs Form 2 SLA. page 1.
- Gil, L. (2009). Cork composites: A review. *Materials*, 2(3):776–789.
- Gil, L. (2015a). Cork: Sustainability and new applications. *Frontiers in Materials*, 1(January):2014–2016.
- Gil, L. (2015b). New cork-based materials and applications. *Materials*, 8(2):625–637.
- Gil, L. (2018). A cortiça como material de construção - Manual Técnico.
- Granta Design Limited (2020). CES EduPack 2020.
- Handa, V., Goyal, P., and Kumar, R. (2020). Review on surface modifications of the workpiece by electric discharge machining. In Singh, S., Prakash, C., Ramakrishna, S., and Krolczyk, G., editors, *Advances in Materials Processing*, pages 21–29, Singapore. Springer Singapore.
- Hennessy, M. G., Vitale, A., Matar, O. K., and Cabral, J. T. (2015). Controlling frontal photopolymerization with optical attenuation and mass diffusion. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 91(6):14–18.
- Ibrahim, A. F. and Mustafa, A. M. (2019). Experimental investigation of machining parameters on material removal rate and surface roughness in chemical machining. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 518(3).
- ISO/ASTM, F. (52900:2013). Additive Manufacturing - General Principles Terminology (ASTM52900). *Rapid Manufacturing Association*, pages 10–12.
- Lopes, M. D. S. (2012). Elaboração e análise de projetos de investimento. *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. Marktest (2014), “Ranking netScope de tráfego web”, Marktest, Portugal.*
- Marbun, F., Napitupulu, R. A., Manurung, C. S., Simanjuntak, S., and Kao, Y. C. (2020). Slicing methodology of a CAD file for 3D printing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 852(1).
- Namdev, S., Pandey, A., and Pandey, A. K. (2018). LBM on variant geometrical features for orthopaedic implants and aerospace alloys: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 377(1).
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., and Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143(December 2017):172–196.
- Nikolidakis, E., Choreftakis, I., and Antoniadis, A. (2018). Experimental investigation of stainless steel SAE304 laser engraving cutting conditions. *Machines*, 6(3):1–8.

- Olmos, C. M., Vaca, A., Rosero, G., Peñaherrera, A., Perez, C., de Sá Carneiro, I., Vizuite, K., Arroyo, C. R., Debut, A., Pérez, M. S., Cumbal, L., and Lerner, B. (2019). Epoxy resin mold and PDMS microfluidic devices through photopolymer flexographic printing plate. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 288(March):742–748.
- Parandoush, P. and Hossain, A. (2014). A review of modeling and simulation of laser beam machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 85:135–145.
- Patil, O. and Chanmanwar, R. (2018). Investigation on Enhancement in Photochemical Machining. *Materials Today: Proceedings*, 5(9):20336–20342.
- Poljaček, S. M., Tomašegović, T., Cigula, T., Gojo, M., and Milčić, D. (2014). Formation of the printing elements in the photopolymer material used in flexography. *Key Engineering Materials*, 611-612:883–891.
- Rashid, A. (2019). *Additive Manufacturing Technologies*.
- Saaty, T. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences* *Int. J. Services Sciences*, 1:83–98.
- Savini, A. and Savini, G. G. (2015). A short history of 3D printing, a technological revolution just started. *Proceedings of the 2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference, HISTELCON 2015: The 4th IEEE Region 8 Conference on the History of Electrotechnologies*, pages 3–10.
- Silva, S. P., Sabino, M. A., Fernandes, E. M., Correlo, V. M., Boesel, L. F., and Reis, R. L. (2005). Cork: Properties, capabilities and applications. *International Materials Reviews*, 50(6):345–365.
- Sureban, R., Kulkarni, V. N., and Gaitonde, V. N. (2019). Modern optimization techniques for advanced machining processes - A review. *Materials Today: Proceedings*, 18:3034–3042.
- Tomašegović, T., Poljaček, S. M., and Leskovic, M. (2016). UVA and UVC modification of photo polymeric surface and application for flexographic deposition of thin coatings. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(24):1–12.
- uz Zaman, U. K., Rivette, M., Siadat, A., and Mousavi, S. M. (2018). Integrated product-process design: Material and manufacturing process selection for additive manufacturing using multi-criteria decision making. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 51(March 2017):169–180.
- Yang, L., Hsu, K., Baughman, B., Godfrey, D., Medina, F., Menon, M., and Wiener, S. (2017). *Electron Beam Technology*.

Anexo A

Esquema de Aplicações da Cortiça

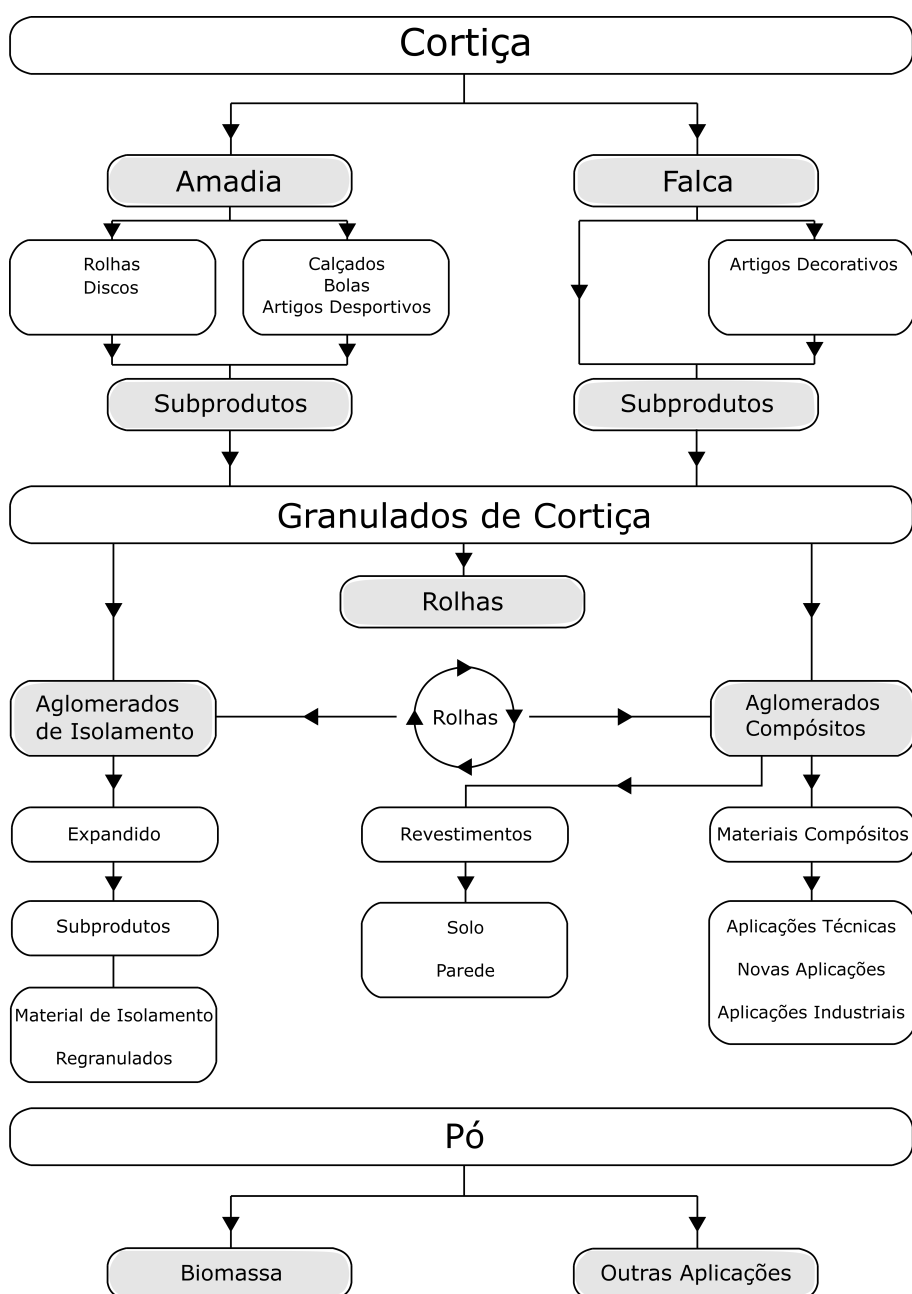


Figura A.1: Esquema do ciclo de vida da cortiça e suas possíveis aplicações. Adaptado de (Corticeira Amorim, S.G.P.S., 2020).

Anexo B

Explicação e Exemplo da Metodologia de *Analytical Hierarchy Process*(AHP)

O *Analytical Hierarchy Process* (AHP) é um modelo de medição que é baseado na comparação de fatores em pares com o objetivo de ordenar/classificar os mesmos numa escala hierárquica. Para isto, é utilizada uma escala de juízo absoluto, apresentada na tabela B.1, que descreve os vários níveis de preferência que um determinado fator pode ter em relação a outro e o correspondente valor recíproco (Saaty, 2008).

Tabela B.1: Escala de juízo absoluto e sua interpretação. Adaptado de (Saaty, 2008)

Interpretação	Nível de Preferência	Valor Recíproco
Extremamente Preferido	9	1/9
Muito Preferido	7	1/7
Preferido	5	1/5
Pouco Preferido	2	1/2
Indiferente	1	1
Valores Intermédios de Preferência	3,4,6,8	1/3,1/4,1/6,1/8

A metodologia de decisão de AHP é decomposta por Saaty (2008) em 4 etapas:

1. Definição do problema e o objetivo da decisão;
2. Estruturação da hierarquia de decisão com o seu objetivo subdividido em fatores de avaliação e deliberação dos elementos que se pretendem avaliar;
3. Construção de matrizes de comparação entre fatores, que são comparados, em termos preferenciais através da escala de juízo absoluto, em relação ao fator que lhes é imediatamente superior, até chegar ao objetivo;
4. Repetição do cálculo dos valores globais de preferência dos fatores até se determinar os valores de preferência dos elementos de avaliação em relação ao objetivo.

De modo a clarificar melhor esta metodologia, supõe-se o caso onde se quer escolher o material mais indicado para uma determinada aplicação (primeira etapa). Para simplificar, considera-se que os requisitos do projeto são uma característica mecânica (CM), uma característica térmica (CT) e que a base de dados dos materiais a serem confrontados corresponde ao material A,B e C. A figura B.1 esquematiza a hierarquia de decisão do problema (segunda etapa).

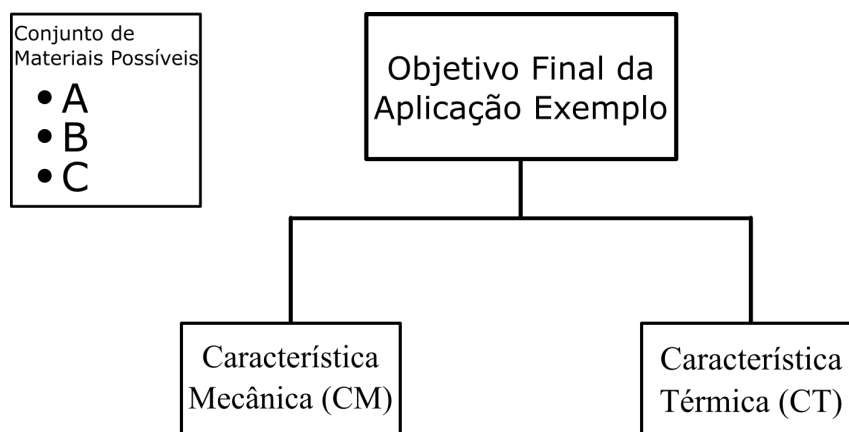


Figura B.1: Esquema hierárquico das categorias de comparação para o exemplo estabelecido.

São construídas as matrizes de comparação do exemplo tendo em conta os fatores que lhe estão subjacentes, neste caso CM e CT, e os elementos de avaliação A, B e C, representadas nas tabelas B.2, B.3 e B.4. Os valores de preferência são gerados tendo em conta a relativa importância ou qualidade de um elemento em relação a outro a que se está a comparar do mesmo nível hierárquico. O nível de preferência estipulado tem em consideração estudos, bases de dados e opiniões de especialistas (uz Zaman et al., 2018).

Pressupõe-se que, neste caso hipotético, a aplicação para o qual o material vai ser selecionado depende mais da CM do material do que da CT. Define-se, então, um nível de preferência de 5 da CM em relação à CT, que é disposto na matriz da tabela B.2, bem como o seu recíproco no elemento transposto. O mesmo pensamento é aplicado nas tabelas B.3 e B.4 sendo que este tipo de características seria, numa situação real, avaliado com base nas propriedades dos materiais.

Tabela B.2: Matriz de comparação entre os fatores referentes à aplicação exemplo

Aplicação do Material			
Fatores	CM	CT	Preferência
CM	1	5	0.83
CT	1/5	1	0.17

Tabela B.3: Matriz de comparação dos materiais (elementos de avaliação) em função da sua característica mecânica (CM)

Característica Mecânica (CM)				
Elementos	A	B	C	Preferência
A	1	1/2	1/4	0.14
B	2	1	1/2	0.29
C	4	2	1	0.57

Tabela B.4: Matriz de comparação dos materiais (elementos de avaliação) em função da sua característica térmica (CT)

Característica Térmica (CT)				
Elementos	A	B	C	Preferência
A	1	1	6	0.55
B	1	1	3	0.35
C	1/6	1/3	1	0.10

Com as matrizes de comparação obtidas, pode-se determinar a preferência ou peso de cada elemento/fator em relação ao fator imediatamente acima. O cálculo consiste na divisão da soma dos valores de cada linha pela soma dos valores da matriz.

Por fim, a classificação dos elementos de avaliação (neste caso os materiais A, B e C) é conseguida ordenando-os pelo seu valor global de preferência. Este último, é calculado a partir da soma dos produtos das preferências de cada elemento. A tabela B.5 apresenta os resultados para este caso específico, onde se pode concluir que o material C é o mais indicado.

Tabela B.5: Resultados finais de preferência para a aplicação exemplo

Peso Total			
	CM	CT	Total
A	0.12	0.09	0.21
B	0.24	0.06	0.30
C	0.47	0.02	0.49

Anexo C

Esquema Geral da Seleção do Conjunto Material-Processo-Máquina

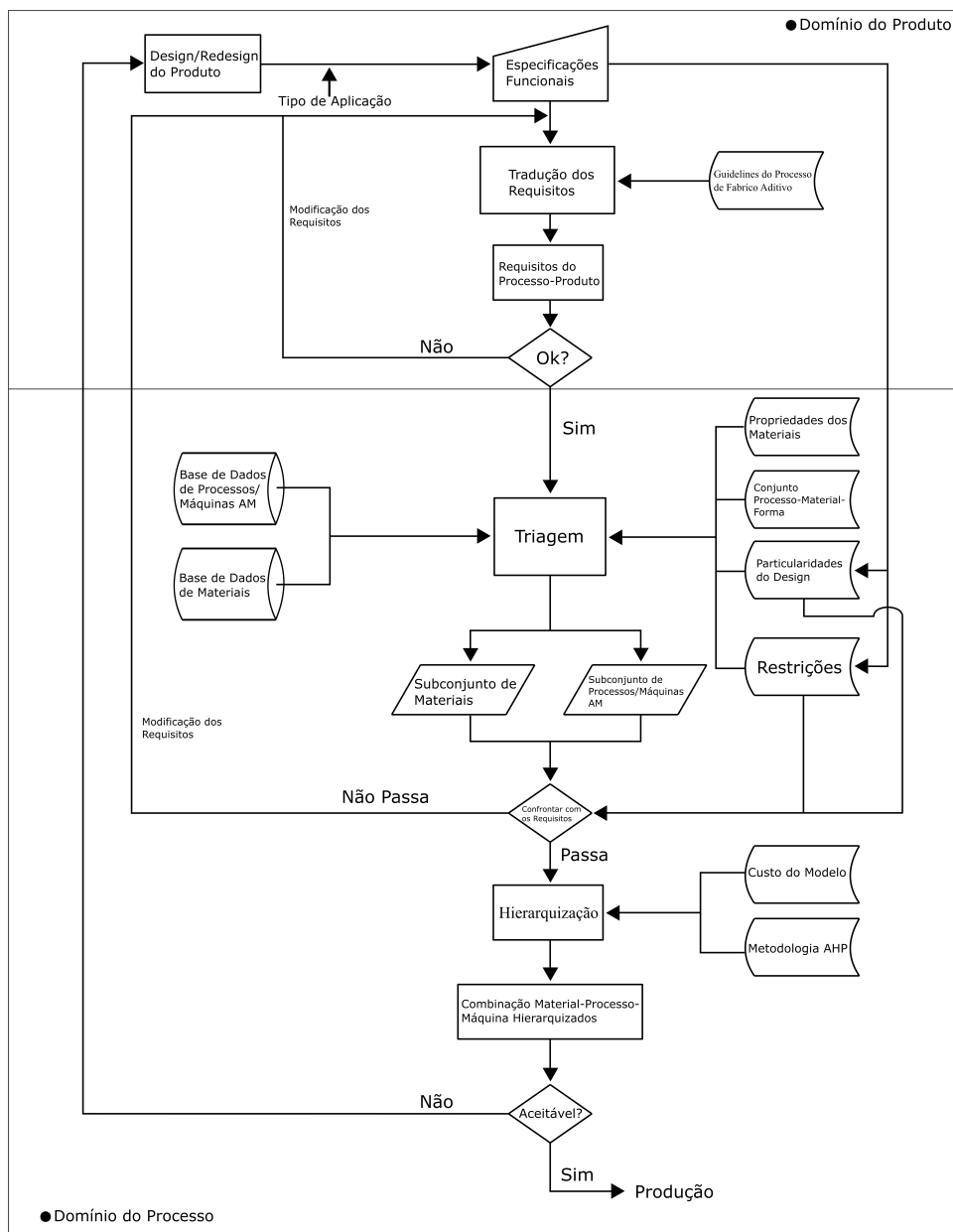


Figura C.1: Esquema geral da metodologia de seleção do conjunto material-processo-máquina para uma aplicação. Adaptado de (uz Zaman et al., 2018).

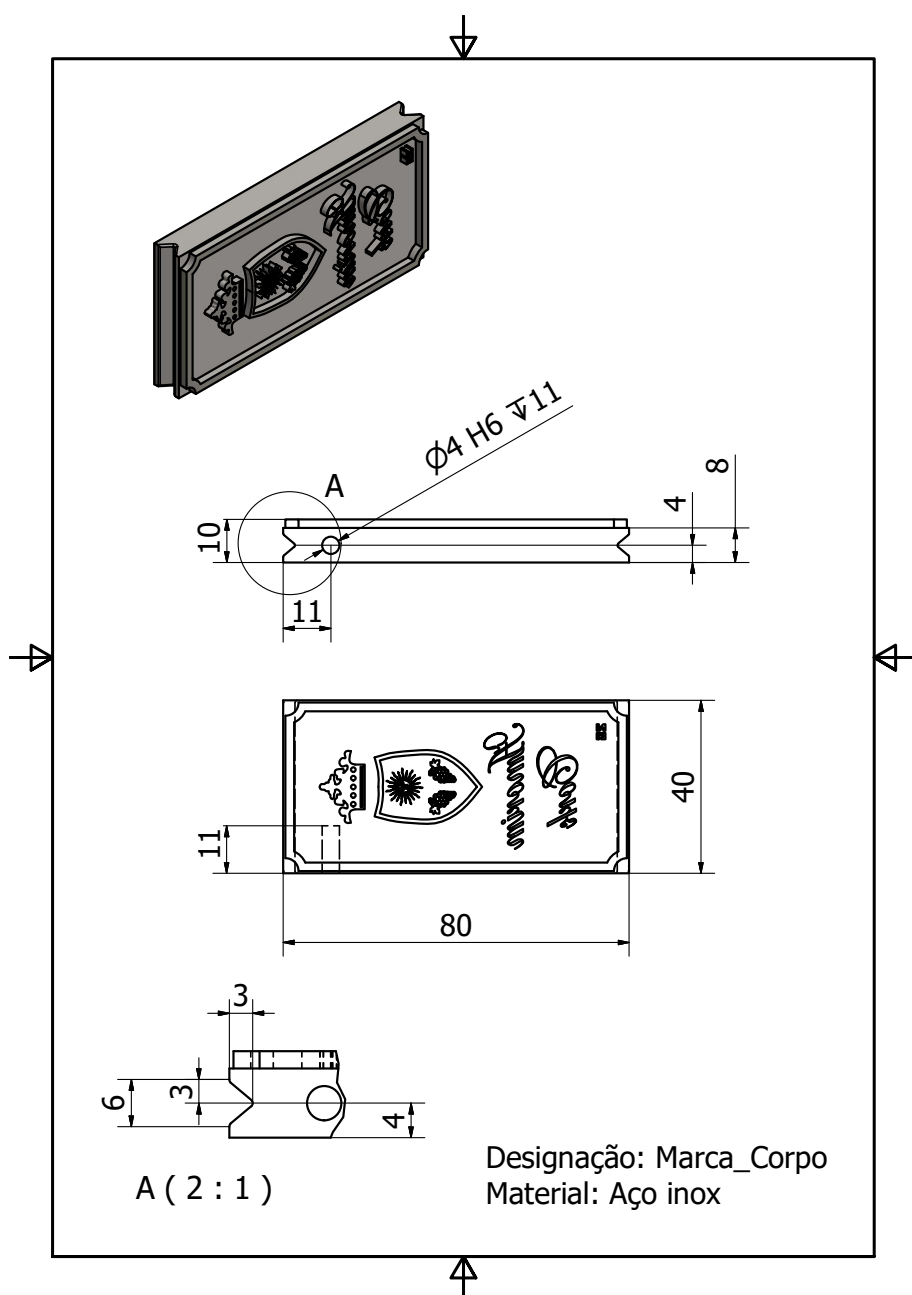
Anexo D**Desenhos Técnicos das Marcas Fabricadas**

Figura D.1: Desenho técnico da marca corpo teste para marcação a fogo.

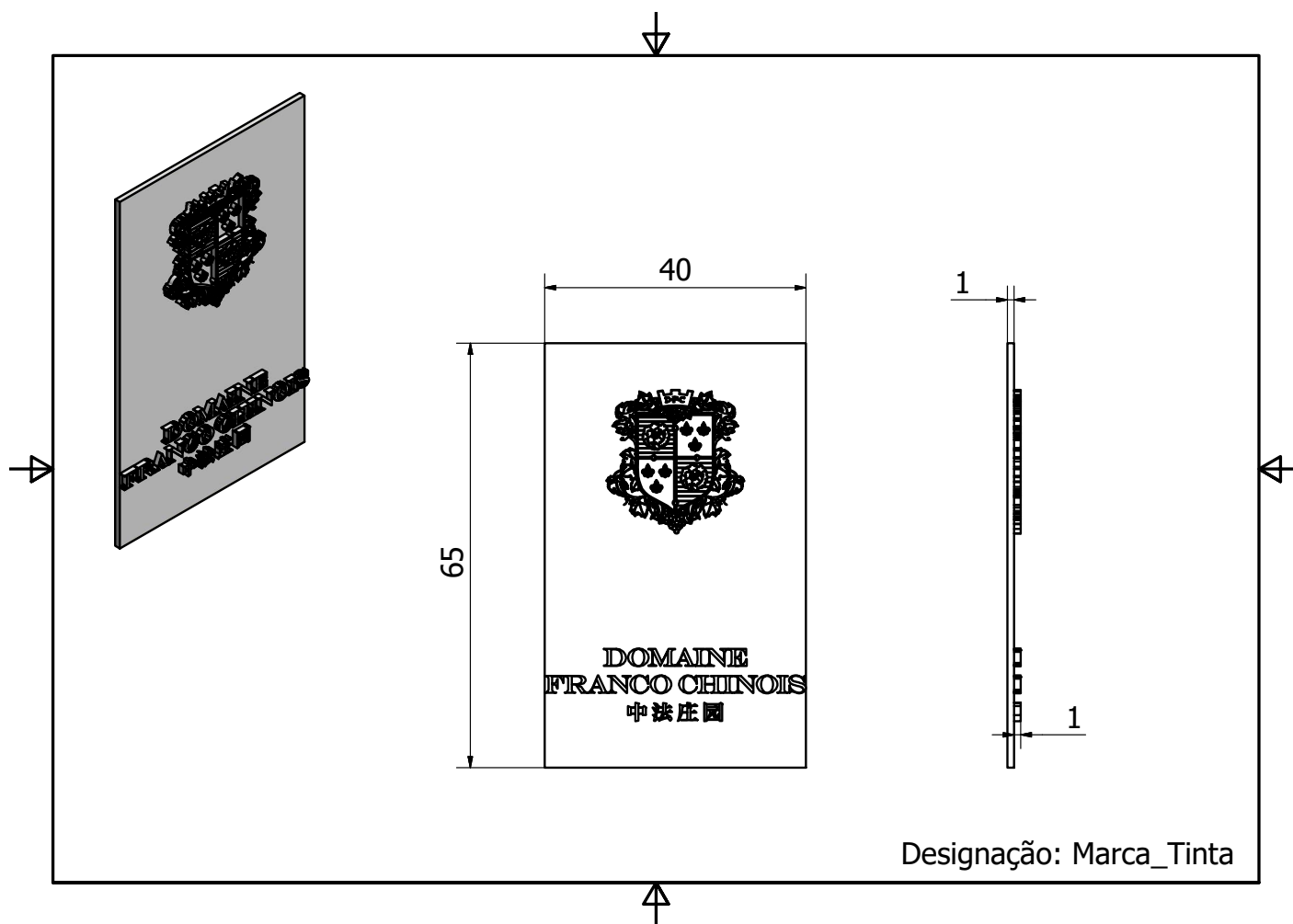


Figura D.2: Desenho técnico da marca teste para marcação a tinta.

Anexo E

Desenhos Técnicos de Exemplos de Códigos e Marcas Topo

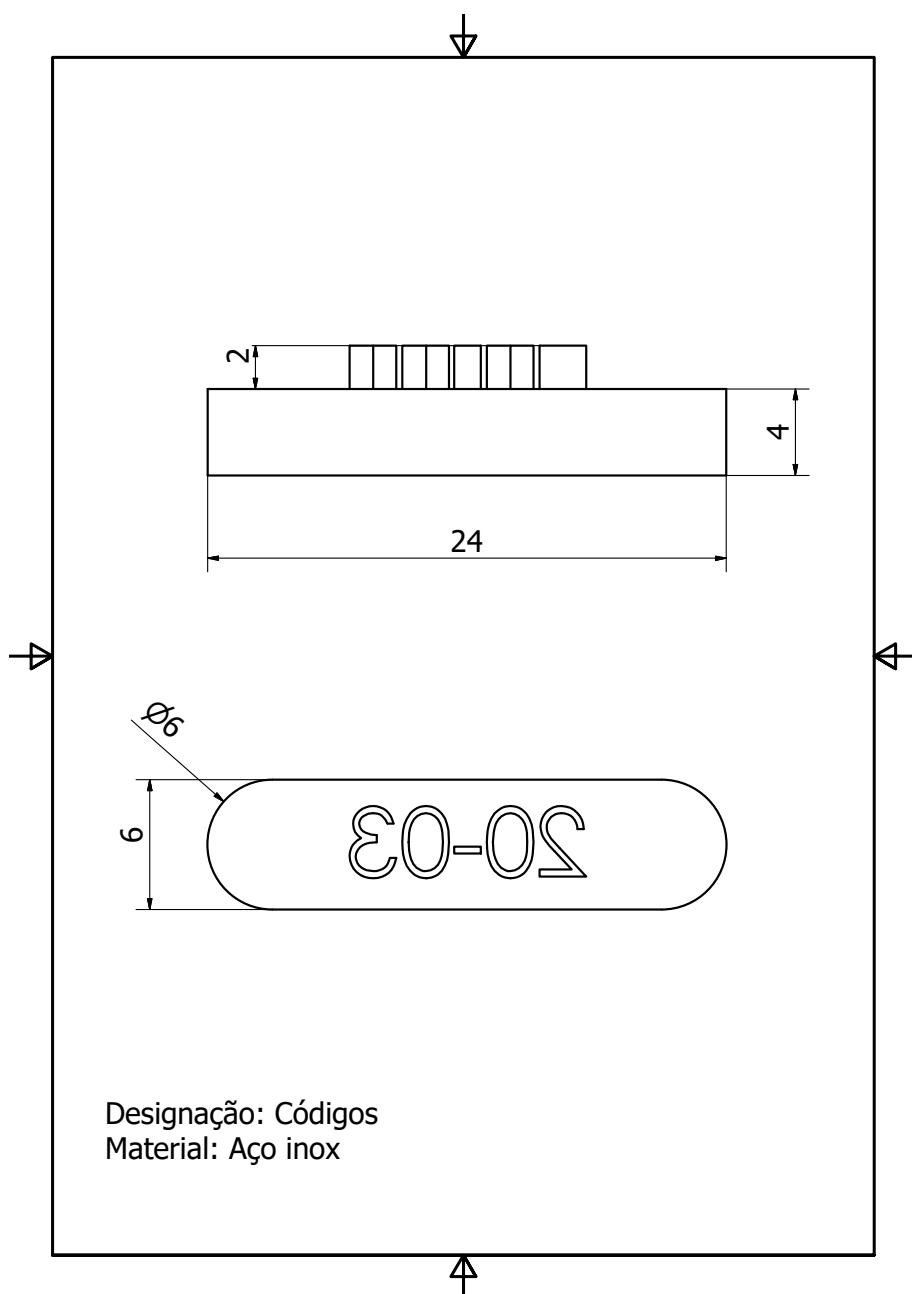


Figura E.1: Desenho técnico de um exemplo de código para marcação a fogo.

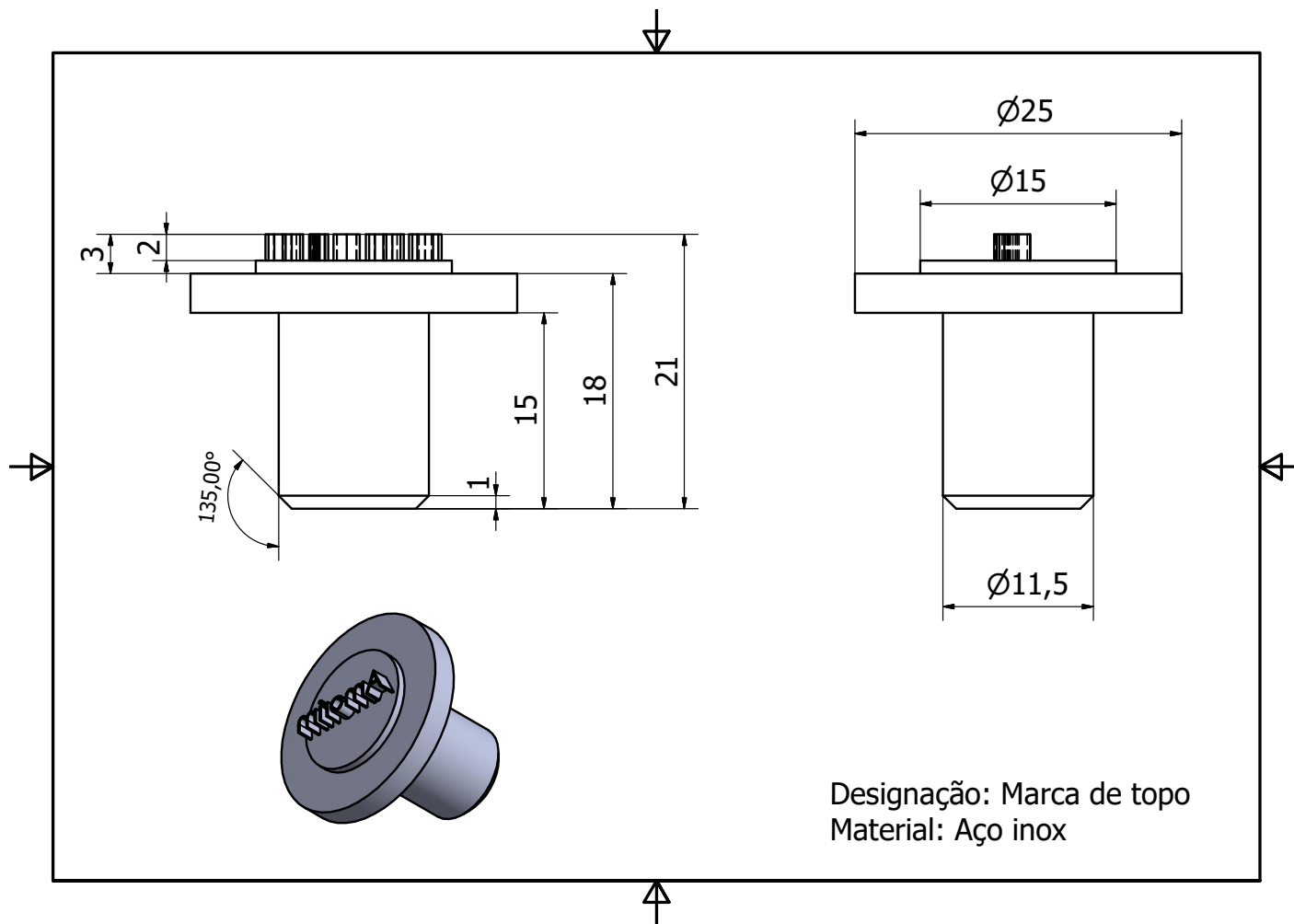


Figura E.2: Desenho técnico de um exemplo de marca topo para marcação a fogo.

Anexo F

Gráficos Realizados para a Triagem de Materiais

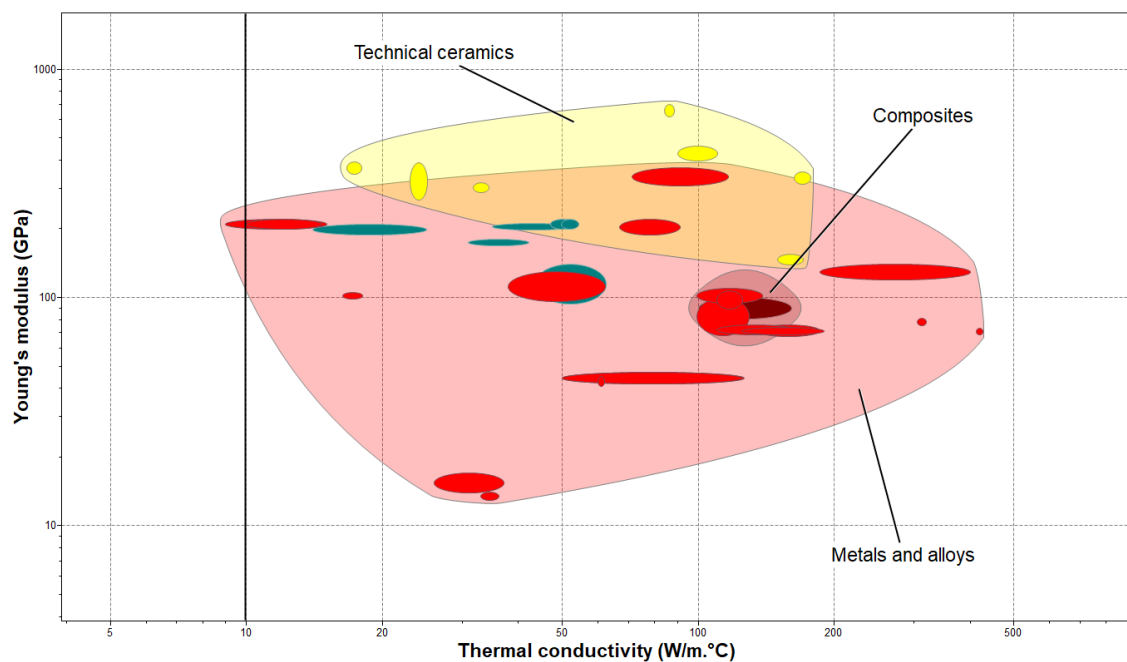


Figura F.1: Gráfico que relaciona o módulo de *Young* (E) com a condutividade térmica ($\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$) na etapa de triagem para a marcação a fogo (Granta Design Limited, 2020). Aplicação do requisito: $k \geq 10[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}]$.

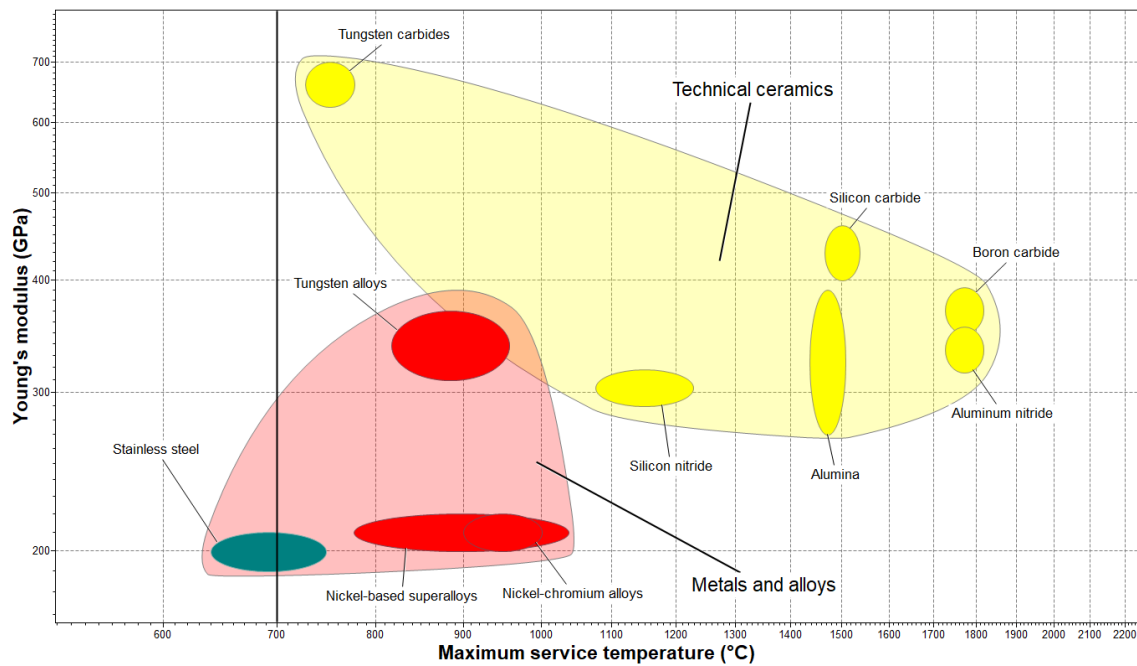


Figura F.2: Gráfico que relaciona o módulo de *Young* (E) com a temperatura de serviço máxima (°C) na etapa de triagem para a marcação a fogo (Granta Design Limited, 2020). Aplicação do requisito: $T_{max} \geq 700$ [°C].

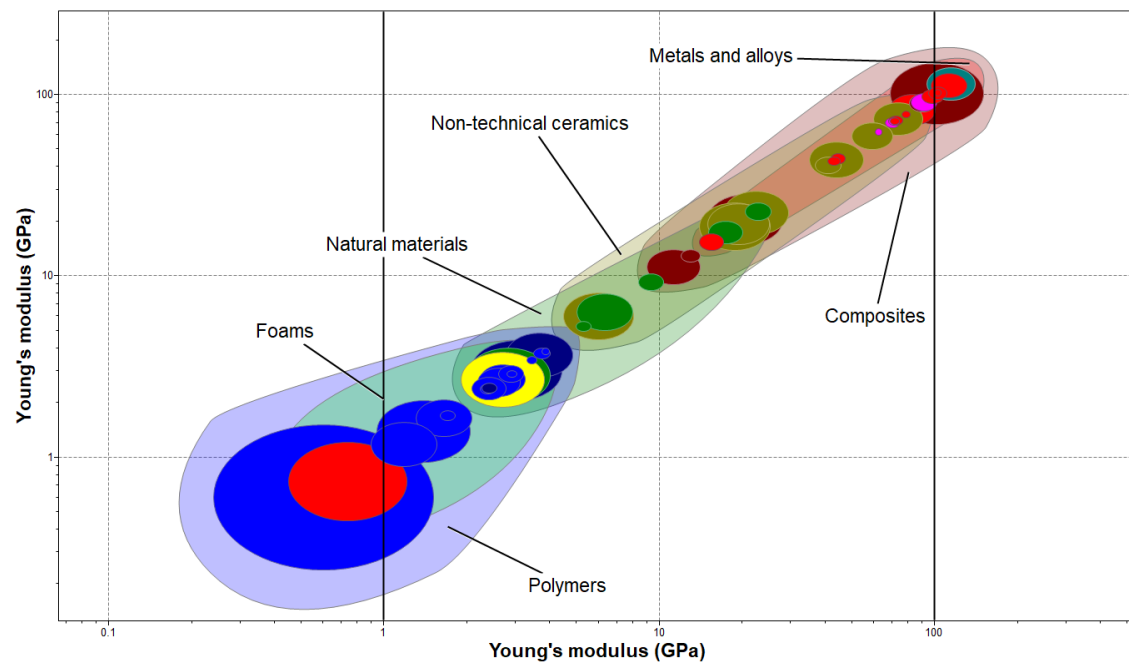


Figura F.3: Gráfico que relaciona o módulo de *Young* (E) com o módulo de *Young* (E) na etapa de triagem para a marcação a tinta (Granta Design Limited, 2020). Aplicação do requisito: $1 \geq E \geq 100$ [GPa].

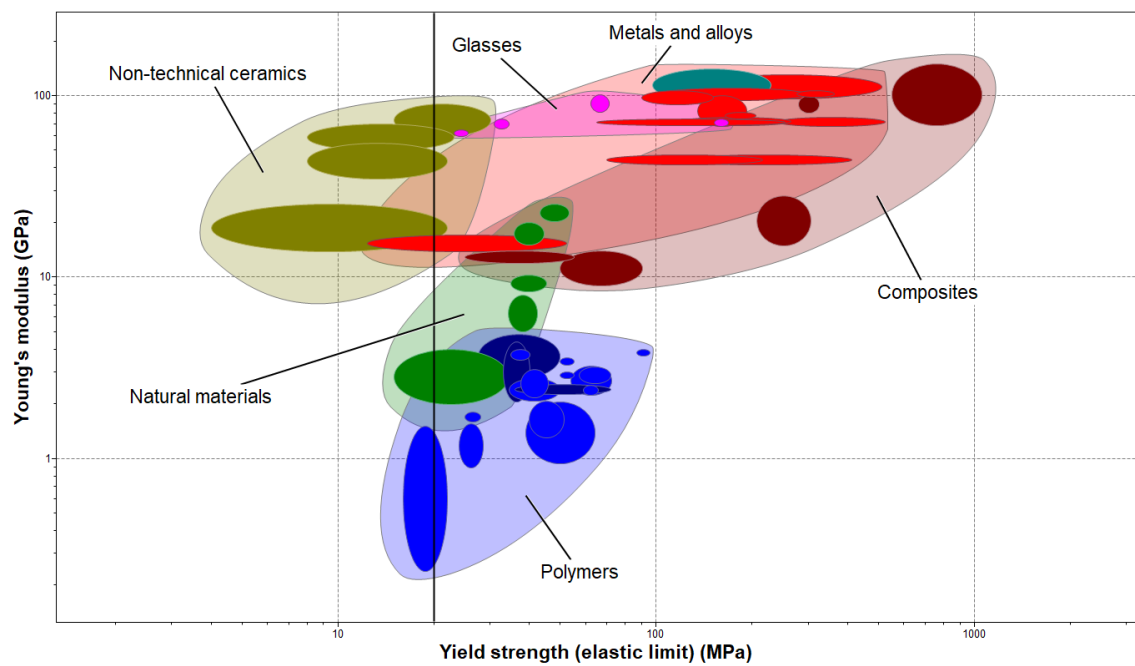


Figura F.4: Gráfico que relaciona o módulo de *Young* (E) com a tensão limite de elasticidade (σ_e) na etapa de triagem para a marcação a tinta (Granta Design Limited, 2020). Aplicação do requisito: $\sigma_e \geq 20[MPa]$.

Anexo G

Matrizes de Comparação Construídas para Metodologia AHP

Tabela G.1: Matriz de comparação do fator de necessidade de pós-processamento (PP) para a marcação a fogo

Necessidade de Pós-Processamento (PP)				
Empresa	C-Int	C-Hib	D-Hib	Preferência
C-Int	1	1/2	1/2	0.20
C-Hib	2	1	1	0.40
D-Hib	2	1	1	0.40

Tabela G.2: Matriz de comparação do fator de mão-de-obra (MO) para a marcação a fogo

Mão-de-Obra (MO)				
Empresa	C-Int	C-Hib	D-Hib	Preferência
C-Int	1	3	3	0.60
C-Hib	1/3	1	1	0.20
D-Hib	1/3	1	1	0.20

Tabela G.3: Matriz de comparação do fator de cadência de produção (CP) para a marcação a fogo

Cadência de Produção (CP)				
Empresa	C-Int	C-Hib	D-Hib	Preferência
C-Int	1	1/7	1/2	0.09
C-Hib	7	1	6	0.74
D-Hib	2	1/6	1	0.17

Tabela G.4: Resultados do fator de índice de flexibilidade produtiva (FP) para cada solução da marcação a fogo

Flexibilidade Produtiva (FP)				
Empresa	PP	MO	CP	Total
C-Int	0.02	0.19	0.05	0.26
C-Hib	0.04	0.06	0.42	0.53
D-Hib	0.04	0.06	0.10	0.20

Tabela G.5: Matriz de comparação do fator de período de recuperação (PR) para a marcação a fogo

Período de Recuperação (PR)				
Empresa	C-Int	C-Hib	D-Hib	Preferência
C-Int	1	2	1/3	0.25
C-Hib	1/2	1	1/4	0.13
D-Hib	3	4	1	0.61

Tabela G.6: Matriz de comparação do fator de qualidade de marcação (QM) para a marcação a fogo

Cadência de Produção (CP)				
Empresa	C-Int	C-Hib	D-Hib	Preferência
C-Int	1	1	1/2	0.25
C-Hib	1	1	1/2	0.25
D-Hib	2	2	1	0.50

Tabela G.7: Matriz de comparação do fator de necessidade de pós-processamento (PP) para a marcação a tinta

Necessidade de Pós-Processamento (PP)				
Empresa	E	F-Rig	F-Flex	Preferência
E	1	2	1/2	0.31
F-Rig	1/2	1	1/3	0.16
F-Flex	2	3	1	0.53

Tabela G.8: Matriz de comparação do fator de mão-de-obra (MO) para a marcação a tinta

Mão-de-Obra (MO)				
Empresa	E	F-Rig	F-Flex	Preferência
E	1	1/4	1/5	0.09
F-Rig	4	1	1/3	0.34
F-Flex	5	3	1	0.57

Tabela G.9: Matriz de comparação do fator de cadência de produção (CP) para a marcação a tinta

Cadência de Produção (CP)				
Empresa	E	F-Rig	F-Flex	Preferência
E	1	3	3	0.60
F-Rig	1/3	1	1	0.20
F-Flex	1/3	1	1	0.20

Tabela G.10: Resultados do fator de índice de flexibilidade produtiva (FP) para cada solução da marcação a tinta

Flexibilidade Produtiva (FP)				
Empresa	PP	MO	CP	Total
E	0.03	0.03	0.34	0.41
F-Rig	0.02	0.11	0.11	0.24
F-flex	0.06	0.18	0.11	0.35

Tabela G.11: Matriz de comparação do fator de período de recuperação (PR) para a marcação a tinta

Período de Recuperação (PR)				
Empresa	E	F-Rig	F-Flex	Preferência
E	1	2	3	0.53
F-Rig	1/2	1	2	0.31
F-Flex	1/3	1/2	1	0.16

Tabela G.12: Matriz de comparação do fator de qualidade de marcação (QM) para a marcação a tinta

Cadência de Produção (CP)				
Empresa	E	F-Rig	F-Flex	Preferência
E	1	2	2	0.50
F-Rig	1/2	1	1	0.25
F-Flex	1/2	1	1	0.25