



NOVA
NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA E INDUSTRIAL

MIGUEL JORGE FARIA

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Melhoria dos processos de projeto e fabrico
aditivo numa empresa industrial

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa

Março, 2023



Melhoria dos processos de projeto e fabrico aditivo numa empresa industrial

MIGUEL JORGE FARIA

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Orientadora: Professora Doutora Helena Victorovna Guitiss Navas
Professora Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Bruno Alexandre Rodrigues Simões Soares
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

Arguentes: Anabela Carvalho Alves,
Professora Auxiliar, Universidade do Minho
Luis Filipe Gouveia Marques Novo,
Diretor Industrial, Eugster & Frismag AG

Orientador: Professora Doutora Helena Victorovna Guitiss Navas,
Professora Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Melhoria dos processos de projeto e fabrico aditivo numa empresa industrial

Copyright © Miguel Jorge Faria, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que

Este documento foi criado com o processador de texto Microsoft Word e o template NOVAthesis Word [11].

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar esta etapa, tenciono agradecer a todos os que me ajudaram a conseguir ultrapassá-la, e que me apoiaram em todos os momentos, e que estiveram presentes.

Desde já, quero agradecer à Professora Helena Navas, que me ajudou no desenvolvimento deste estudo e orientou-me segundo a filosofia *Lean*, e a todos os professores que me acompanharam e me lecionaram durante todo o curso.

Gostaria também de agradecer à minha família por todo o suporte, apoio e amparo que me deram durante este percurso, e nunca me deixaram desistir.

Gostaria de agradecer aos meus amigos e colegas, que permitiram alegrar esta jornada, e foram elementos facilitadores neste percurso, refiro-me aos amigos de sempre e a tantos amigos novos que tive a oportunidade de fazer durante esta experiência.

Gostaria de agradecer a todos os colaboradores da Eugster & Frismag Lda. pelo apoio e companheirismo nestes 6 meses de estágio.

Por último, mas não menos importante, quero dirigir um agradecimento especial ao Senhor Engenheiro Luís Novo, ao Senhor Luís Carlos, ao Senhor Engenheiro Rafael Jorge e ao Senhor Pedro Franco, por todos os ensinamentos e experiências que partilharam comigo, e por todas as oportunidades de trabalho que me deram, bem como as experimentações que me confiaram.

Resumo

O progressivo crescimento da competitividade empresarial no setor de eletrodomésticos, o aumento dos custos da matéria-prima, a evolução tecnológica global e as exigências dos clientes levaram as empresas à necessidade de implementar metodologias de melhoria dos processos internos com o objetivo de aumentar a sua produtividade, a qualidade dos seus produtos e a sua velocidade de resposta às exigências dos clientes e do mercado. As empresas apresentam uma necessidade premente de melhorar os processos internos, visando a eficiência, a redução de custos e a eliminação dos desperdícios.

A empresa de eletrodomésticos Eugster & Frismag, assim como outras empresas do ramo, procuram implementar novos processos tecnológicos inovadores, que visam não só a área de fabrico como também a metodologia de projeto. Nos últimos anos a empresa está a implementar cada vez mais a filosofia *Lean* em todas as suas áreas funcionais. Neste âmbito, o objetivo do estudo desenvolvido, visou a implementação da tecnologia de impressão 3D no ambiente *Lean* da empresa.

No estudo foram utilizadas algumas ferramentas de apoio (relatórios 3C's, *brainstorming* e observação direta) e ferramentas analíticas do *Lean* (*gemba walk*, A3, 5S e trabalho padronizado).

Foram desenvolvidas algumas propostas de melhoria, entre elas, uma ferramenta auxiliar para a montagem dos motores, realocação da área de impressão 3D e melhoria do seu *layout* e a criação de um procedimento de impressão 3D. Durante o desenvolvimento do procedimento surgiram novas oportunidades de melhoria do processo de fabrico dos componentes, como por exemplo: melhoria da orientação da peça, melhoria da escolha da resina e redução do tempo de limpeza.

A implementação das melhorias propostas resultou numa redução do tempo de espera, dos *stocks*, dos movimentos e dos defeitos (dos 30% passou para 10%). Também foi melhorada uma ferramenta auxiliar à montagem de máquinas de café que permitiu poupar cerca de 900€. O aspeto das peças impressas ficou mais apelativo, assim como a sua resistência mecânica melhorou.

Palavras-chave: *Lean*, Manufatura Aditiva, Impressão 3D, Trabalho Padronizado, *Kaizen*, 5S.

ABSTRACT

The progressive growth of the business competitiveness in the household appliances sector, the increase of the raw material's cost levels, the global technological evolution and the strict requirements of customers have necessarily led companies to put into practice methodologies that improve internal processes and, consequently, the search for a methodology which increases its productivity, that improves the quality of its products and that boosts its speed of response to the demands of customers and of the market. Companies have a pressing need to improve internal processes, aiming at efficiency, which includes the reduction of costs and waste.

The household appliance company Eugster & Frismag, as well as other companies in this same business area, seek to implement the Lean philosophy and some innovative techniques, both in the design phase as in the production process. In this context, the objective of this study aimed, precisely, at the implementation of the Lean philosophy combined with the 3D printing technology in the mentioned company.

This study relied on the use of some Lean analytical tools (gemba walk, A3, 5S and standardized work) and on some other support tools (3C's reports, brainstorming and direct observation). Some betterment suggestions were developed, such as, an auxiliary tool for the assembly of the engines, the relocation of the 3D printing area, as well as the enhancement of its *layout* and the creation of a 3D printing procedure.

During the development of the procedure, there was still room for improvement in the manufacturing process of the components, specifically, the improvement in the orientation of the part, along with the upturns in the choice of resin and a reduction in the cleaning time, among others.

The implementation of the suggested improvements resulted in a reduction in the waiting time, stocks, the movements and the defective products (from 30% to 10%). There were also the improvements achieved in an auxiliary tool to assembly coffee machines, which saved about 900 €. Finally, it's also important to mention a strong enhancement what the appearance of the printed parts, as well as, their mechanical strength is concerned.

Keywords: Lean, Additive Manufacturing, 3D printing, Standardized work, Kaizen, 5S

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento, Motivação e Objetivos do Estudo	1
1.2	Metodologia do Estudo.....	2
1.3	Estrutura da Dissertação.....	3
2	METODOLOGIAS DE APOIO À MELHORIA DE PROCESSOS	5
2.1	Filosofia <i>Lean</i>	5
2.1.1	Enquadramento histórico da filosofia <i>Lean</i>	5
2.1.2	Princípios do <i>Lean Thinking</i>	7
2.1.3	Tipos de desperdícios.....	9
2.1.4	Ferramentas analíticas do <i>Lean</i>	10
2.2	Outras metodologias.....	15
3	INTRODUÇÃO À IMPRESSÃO 3D	19
3.1.1	Conceito	19
3.1.2	História da impressão 3D.....	20
3.1.3	Variantes da Manufatura Aditiva.....	22
4	ESTUDO DE CASO	27
4.1	Grupo Eugster/Frismag.....	27
4.1.1	Contexto histórico	28
4.1.2	Enquadramento empresarial	29
4.2	Eugster & Frismag Portugal.....	30

4.2.1	Unidade de Produção de Plásticos.....	30
4.2.2	Unidade de Montagem.....	31
4.3	Identificação de problemas e oportunidades de melhoria.....	35
4.3.1	Processo de Projeto	37
4.3.2	Processo de Fabrico	38
4.3.3	Organização e Formação	40
4.3.4	Linha de montagem de motores.....	42
4.4	Análise e triagem dos problemas	42
4.5	Propostas de melhoria	44
4.5.1	Melhorias no Projeto	44
4.5.2	Melhorias no Fabrico.....	58
4.5.3	Melhorias na Organização e Formação.....	66
4.5.4	Melhoria na linha de montagem de motores	73
4.6	Discussão de resultados	78
4.6.1	Resultados obtidos no projeto	79
4.6.2	Resultados obtidos no fabrico	80
4.6.3	Resultados obtidos na organização e formação.....	81
4.6.4	Resultado obtido na linha de montagem de motores	82
5	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
	ANEXOS	91
	Anexo A. Relação entre materiais e resinas	91
	Anexo B. Procedimento de Impressão 3D.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Bases do <i>Toyota Production System</i>	6
Figura 2.2 - Ciclo do <i>Lean Thinking</i>	8
Figura 2.3 - Comparação entre sistema tracional e o sistema <i>One Piece Flow</i>	13
Figura 2.4 - Casa do MPT	14
Figura 2.5 - Ferramenta dos 3C's.....	15
Figura 2.6 - Exemplo da ferramenta dos 5 Porquês.....	16
Figura 2.7 - Exemplo de Fluxograma	17
Figura 3.1 - Conversão do ficheiro CAD para stl	19
Figura 3.2 - Processo de fabrico aditivo	20
Figura 3.3 - Mecanismo da patente US 3596285A.....	21
Figura 3.4 - Tecnologia FDM.....	23
Figura 3.5 - Tecnologia SLA.....	24
Figura 3.6 - Tecnologia SLS	25
Figura 4.1 - Valores do grupo Eugster/Frismag AG	28
Figura 4.2 - Serviços do Grupo Eugster&Frismag.....	29
Figura 4.3 - Eugster & Frismag Lda	30
Figura 4.4 - Produção de plásticos numa unidade de produção	31
Figura 4.5 - Linha de montagem de máquinas de café	31
Figura 4.6 - Organograma do GEP.....	32
Figura 4.7 - Impressora da FormLabs - Form 3L.....	33
Figura 4.8 - Máquina de Lavar da FormLabs - Wash L.....	34
Figura 4.9 - Curadora da FormLabs - Cure L.....	34
Figura 4.10 - Exemplificação do PreForm.....	35
Figura 4.11 - <i>Layout</i> do GEP.....	41

Figura 4.12 - Peça Impressa em Grey Pro	45
Figura 4.13 - Peça impressa pela Tough 1500.....	47
Figura 4.14 - Comparação da Flexible 80A com a Elastic 50A	48
Figura 4.15 - Comparação entre as resinas utilizadas	49
Figura 4.16 - Erros superficiais causados pelo uso incorreto dos suportes	50
Figura 4.17 - Erro funcional causado pela falta de suportes.....	50
Figura 4.18 - Objeto exemplo.....	51
Figura 4.19 - Teste de suportes.....	52
Figura 4.20 - Teste de <i>rafts</i>	54
Figura 4.21 - Vistas do dispensador	55
Figura 4.22 - Teste de ângulos de impressão no PreForm.....	56
Figura 4.23 - Teste de ângulos de impressão.....	56
Figura 4.24 - Plataforma de impressão	57
Figura 4.25 - Reservatórios de álcool.....	61
Figura 4.26 - Processo de transporte de álcool	62
Figura 4.27 - Conjunto funil.....	62
Figura 4.28 - Curadora a emitir luz UV com recipiente.....	63
Figura 4.29 - Ilustração de como dispor as peças na curadora	65
Figura 4.30 - Cura de 5 peças distribuídas radialmente	65
Figura 4.31 - Novo <i>layout</i> do GEP.....	66
Figura 4.32 - Fotografia da curadora e da máquina de lavar na nova área da MA.....	66
Figura 4.33 - Fotografia da impressora na nova área da MA.....	67
Figura 4.34 - Impressora identificada por adesivos verdes que indicam as zonas limpas	67
Figura 4.35 - Processo de fabrico aditivo através da impressão 3D	69
Figura 4.36 - Processo de impressão	70
Figura 4.37 - Subprocesso de impressão	70
Figura 4.38 - Processo de lavagem.....	71
Figura 4.39 - Subprocesso de lavagem.....	71
Figura 4.40 - Processo de cura	72
Figura 4.41 - Projeto dispensador.....	74
Figura 4.42 - Projeto da tampa do dispensador de bolas	75
Figura 4.43 - Resultado da Impressão do dispensador de bolas.....	75
Figura 4.44 - Cura das peças do dispensador	76
Figura 4.45 - Casca esquerda do dispensador	76

Figura 4.46 - Tampa do dispensador	77
Figura 4.47 - Varão que empurra bolas do dispensador.....	77
Figura 4.48 - Interior do dispensador	77
Figura 4.49 - Dispensador montado	77
Figura A. 1 - Exemplo do PreForm	93
Figura A. 2 - Ilustração da Wash L.....	95

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Simbologia utilizada nos Fluxogramas.....	17
Tabela 4.1 - Primeira auditoria 5S.....	36
Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas da resina Grey Pro e os materiais equivalentes.	46
Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas da resina Tough 1500 e os polímeros equivalentes.....	47
Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas da Flexible 80A e os polímeros equivalentes.....	49
Tabela 4.5 - Comparação entre vários tipos de suportes	53
Tabela 4.6 - Comparação entre as diferentes jangadas.....	54
Tabela 4.7 - Comparação entre IPA e TPM.....	58
Tabela 4.8 - Forma de limpar peças com geometrias específicas	60
Tabela 4.9 - Tempo de lavagem de cada resina	60
Tabela 4.10 - Soluções para cura correta de geometrias específicas.....	64
Tabela 4.11 - Última auditoria 5S.....	78
Tabela A. 1 - Semelhanças entre vários materiais e resinas.....	91
Tabela A. 2 - Tempo e Temperatura de Cura para cada Resina.....	96

ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

3D	3 Dimensões
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAMPS	<i>Computer Automated Manufacturing Process and System</i>
DfAM	<i>Design for Additive Manufacturing</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
GEP	Gestão de Equipamentos da Produção
IPA	<i>Isopropyl alcohol</i>
HDPE	<i>High-density polyethylene</i>
JIT	<i>Just-in-Time</i>
KPI	<i>Key Performance Index</i>
LCIA	<i>Low Cost Industrial Automation</i>
LDPE	<i>Low-density polyethylene</i>
MA	Manufatura Aditiva
MPT	Manutenção Produtiva Total
PC	<i>Polycarbonate</i>
PP	<i>Polypropylene</i>

SLA	<i>Stereolithography</i>
SLS	<i>Selective laser sintering</i>
STL	<i>Standard Tessellation Language</i>
TPM	<i>Tripropylene glycol monomethyl ether</i>
TPS	<i>Toyota Production System</i>
TPU	<i>Thermoplastic Polyurethanes</i>
UV	Ultravioleta

INTRODUÇÃO

No presente capítulo é abordado o enquadramento e a motivação para a realização deste estudo, bem como os objetivos, metodologia do estudo e a estrutura da dissertação.

1.1 Enquadramento, Motivação e Objetivos do Estudo

A pressão global em que as organizações se encontram impõe uma procura por novos métodos e recursos. Confrontadas com estas mudanças, as organizações veem-se obrigadas a melhorar continuamente, aplicando determinadas filosofias e abordagens que passam a integrar a sua forma de atuação. As indústrias de processo, que englobam empresas químicas, farmacêuticas, petrolíferas, cosméticas, metalúrgicas e todas aquelas que transformam matérias-primas por processos químicos, biológicos e físicos, estão no centro de diversas cadeias de valor para fornecer aos clientes produtos e serviços que satisfaçam as suas necessidades (Pont & Azzaro-Pantel, 2014).

A revolução de novas tecnologias tem impacto na produção e distribuição de bens e serviços e terão consequências de longo alcance para a produtividade, capacidades, bem-estar e meio ambiente (OECD, 2016). A introdução destas novas tecnologias, como a manufatura aditiva, conduziu as empresas ao seu crescimento e a uma maior eficiência.

A manufatura aditiva está a encontrar aplicações no projeto e no desenvolvimento de qualquer setor (Gibson et al., 2015). A impressão 3D é uma das tecnologias da Manufatura Aditiva. Entre outras, vantagens a impressão 3D permite projetar, fabricar e montar peças que outras tecnologias não permitem. Ao unir esta tecnologia, que poderá reduzir custos de fabrico e tempos de fabrico, a uma empresa que se apoia na filosofia *Lean*, procura-se a melhoria contínua recorrendo a novas tecnologias.

Neste âmbito, o estudo foi realizado na empresa de eletrodomésticos, a empresa Eugster & Frismag. Recentemente a empresa começou a implementar a filosofia *Lean*. Na ótica da melhoria dos processos produtivos a empresa começou, sem sucesso, experiências da impressão 3D de componentes em alguns processos produtivos.

Assim, o objetivo do estudo formulado inicialmente na empresa, centrou-se nas técnicas de impressão 3D no fabrico de alguns componentes no ambiente *Lean* da empresa. Para além do objetivo inicialmente formulado surgiram outros objetivos, nomeadamente a criação de uma ferramenta auxiliar para a montagem de motores, a formação dos funcionários e a formulação de um procedimento de um protocolo de impressão 3D.

A avaliação dos possíveis problemas, que ocorriam na impressão 3D, através de análises computacionais e da análise de componentes impressos, permitiu formular alguns objetivos secundários, no âmbito da melhoria dos processos de impressão 3D e da introdução da tecnologia no dia-a-dia da empresa. Estes objetivos focaram-se tanto no fabrico e na montagem como no projeto.

A implementação da impressão 3D num ambiente *Lean*, impulsionou outros objetivos e a melhoria de outros aspetos técnicos e organizacionais da empresa, nomeadamente surgiram objetivos/necessidades como a melhoria do *layout*, de fluxos funcionais, necessidade de organização e limpeza dos espaços e necessidades de formação.

1.2 Metodologia do Estudo

No intuito de cumprir com os objetivos propostos, formulou-se uma lista de etapas, que se apresentam seguidamente:

- 1ª Etapa: Inicialmente, caracterizou-se a empresa, definiram-se os processos produtivos sujeitos ao estudo e examinaram-se as experiências já efetuadas na implementação da filosofia *Lean* no processo da impressão 3D. Neste processo de análise foram utilizadas algumas ferramentas de apoio, assim como o *gemba walk*, observação direta, a análise dos documentos internos e *brainstorming*,
- 2ª Etapa: Após a avaliação e análise dos processos, identificaram-se os problemas e os pontos a melhorar. No sentido de examinar os processos de forma mais precisa, foram utilizadas as seguintes ferramentas: *gemba walk*, observação direta, 5S, *brainstorming*, fluxogramas de processos, cálculo dos KPIs iniciais e a análise dos problemas internos;

- 3ª Etapa: Os problemas identificados careceram de uma análise e triagem, de forma a propor uma melhoria para os que fossem mais urgentes e para os que tivessem maior impacto. Neste processo de triagem e análise utilizou-se o *brainstorming*;
- 4ª Fase: Após triagem e análise foram elaboradas algumas propostas de melhoria que foram transmitidas à organização;
- 5ª Fase: Após a organização e estruturação das propostas de melhoria, procedeu-se à triagem e, foram selecionadas as que se apresentavam como mais oportunas e mais eficientes. Para facilitar a triagem destas propostas utilizou-se o *brainstorming* e a observação direta;
- 6ª Fase: A seguir foi realizada monitorização da implementação das propostas de melhoria através de ferramentas como o *gemba walk* e observação direta;
- 7ª Fase: De forma a concluir este estudo, analisaram-se os resultados da implementação das propostas de melhoria através do cálculo dos KPIs finais, das auditorias 5S finais e também foram aplicados nesta fase a observação direta e *brainstorming*.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos:

O primeiro e presente capítulo, introduz o trabalho, apresenta o enquadramento do trabalho, a motivação e os objetivos do estudo bem como a metodologia do estudo e a estrutura da dissertação. Estes expõem o contexto empresarial e temporal, bem como o incentivo para a produção deste estudo e a escrita desta dissertação.

O segundo capítulo é dedicado à revisão bibliográfica e visa a introdução da filosofia *Lean* e outras metodologias de apoio à melhoria de processos. O subcapítulo relacionado com a filosofia *Lean* é constituído pelos seguintes subcapítulos: Enquadramento histórico da filosofia *Lean*, Princípios do *Lean*, Tipos de desperdícios, Ferramentas analíticas do *Lean*.

O terceiro capítulo visa a revisão bibliográfica dedicada à introdução da impressão 3D. Este capítulo contém os subcapítulos que abordam os seguintes temas: Conceito da Impressão 3D, a História da impressão 3D e as Variantes da Manufatura Aditiva.

O quarto capítulo descreve o estudo de caso, e é composto pelos seguintes subcapítulos: o Grupo Eugster/Frismag, a Eugster & Frismag Portugal, Identificação de problemas e oportunidades de melhoria, Propostas de melhoria e Discussão de Resultados.

No quinto capítulo encontram-se as conclusões e propostas para futuros trabalhos. Neste capítulo nomeiam-se as lições e deduções retiradas do estudo de caso e a recomendam-se/sugerem-se futuros trabalhos a desenvolver nesta empresa.

METODOLOGIAS DE APOIO À MELHORIA DE PROCESSOS

O presente capítulo aborda a revisão bibliográfica da filosofia *Lean* e de outras ferramentas de apoio.

2.1 Filosofia *Lean*

A filosofia *Lean* é não só uma filosofia empresarial, mas também uma filosofia de melhoria pessoal visto que, para além das ferramentas analíticas e de intervenção, também pode ser vista como um modo de estar (Dahl, 2020).

A filosofia *Lean* propõe um conjunto de ferramentas analíticas e de intervenção que auxiliam na identificação e eliminação dos desperdícios sendo uma filosofia que, aplicada nas empresas, as torna mais eficientes e lhes permite melhorar a qualidade, reduzir o tempo e o custo.

2.1.1 Enquadramento histórico da filosofia *Lean*

O ser humano sempre procurou pela eficiência e por retirar todos os desperdícios, um dos exemplos mais primórdios a ter-se, é a criação da roda. A criação da roda permitiu reduzir desperdícios relacionados com o esforço físico humano e/ou animal. Outro exemplo da procura pela eficiência deu-se nos anos 1450s em Veneza, Itália. Nesta altura, o processo de construção de navios de galé era padronizado e eliminando desperdícios, conseguia mover navios numa linha de produção numa hora (Roser, 2017). Em 1574, o processo do arsenal veneziano era tão avançado que o rei Henrique III de França testemunhou um dos navios a ser construído do início ao fim. Ao padronizar o processo, os construtores dos navios venezianos conseguiram maximizar a eficiência, a qualidade e a segurança do seu processo (Lawton, 2019).

Mas, a primeira pessoa a integrar completamente este processo de produção foi Henry Ford, o criador da Ford (Bhamu & Sangwan, 2014). Em 1913, conseguiu unir uma produção de

partes intercambiáveis com um tipo de trabalho estandardizado e o transporte em movimento para criar o *flow production*, ou, em português, produção de fluxo (Lean Enterprise Institute, 2022). Não obstante deste tipo de produção em massa, persistiam problemas na Ford: a inexistência de variedade do produto e o facto do *stock* de material se acabar em poucos dias.

Nos anos 30s Kiichiro Toyoda, filho do Sakichi Toyoda, dono da Toyota, e Taiichi Ohno, engenheiro mecânico da Toyota, visitaram a Ford e, após analisarem o sistema de produção, concluíram que inovações simples permitiriam produzir em fluxo, mas com uma grande variedade de produtos (Tarantino, 2022). Com estas pequenas inovações criaram o *Toyota Production System* ou TPS. Este conceito melhorou os processos de produção, aumentou a satisfação dos funcionários no trabalho e produziu em lotes reduzidos (Gupta & Jain, 2013), permitindo uma maior flexibilidade, eliminando desperdícios associados à produção, sem descurar a qualidade, para além de não acumular *stock* desnecessário (Womack & Jones, 1996).

O TPS baseia-se em dois conceitos: o *JIT* ou *Just-in-Time* (Shah & Ward, 2003), um conceito que adequa a produção à procura através do fornecimento apenas dos bens que foram encomendados, focando-se na eficiência e na produtividade; e o conceito "*Jidoka*", que traduzido à letra, significa automação com o toque humano, ou seja, quando ocorria um problema, o equipamento parava imediatamente, impedindo a produção de produtos defeituosos. (Skhmot, 2017). Na figura 2.1 encontra-se a "casa" do *Toyota Production System*.

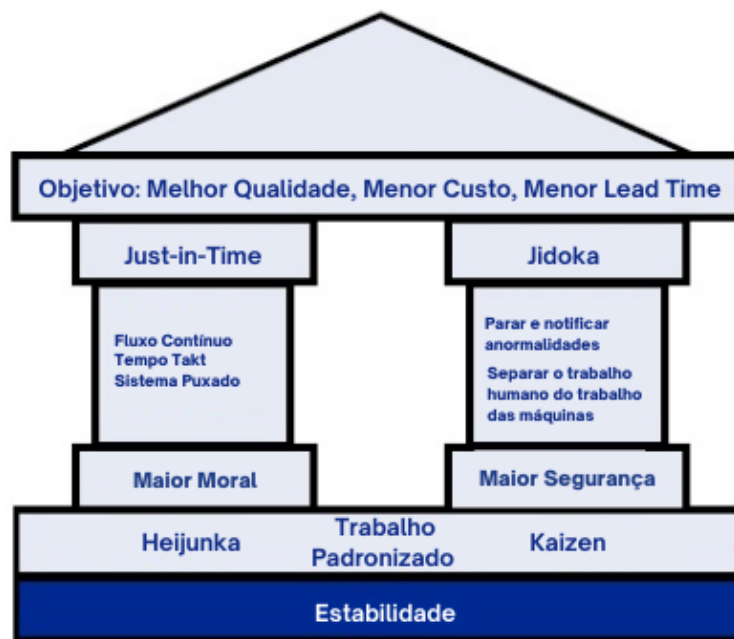


Figura 2.1 - Bases do *Toyota Production System*

(Lean Institute Brasil, 2022)

A ideia de *Lean Thinking* foi introduzida através de *James P. Womack, Daniel T. Jones e Daniel Roos* no livro *The Machine That Changed the World* em 1990 (Womack et al., 1990). Neste livro os autores descrevem a filosofia *Lean* através de uma comparação entre produção artesanal e produção em massa, defendendo que "uma produção artesanal usa trabalhadores de elevada qualidade, mas com ferramentas simples e flexíveis para fazer exatamente o que o consumidor quer", e que "um produtor em massa usa profissionais de pouca qualidade para desenhar produtos feitos por trabalhadores com nenhuma qualidade ou quase nula utilizando máquinas dispendiosas e com uma única função". Uma produção *Lean* "combina as vantagens de produção artesanal e da produção em massa, eliminando altos custos".

A filosofia *Lean* é inspirada na TPS (Holweg, 2007). Foca-se no cliente e visa a eliminação dos desperdícios e entrega os produtos no tempo exato, melhorando o processo, o ambiente empresarial e a economia da empresa.

2.1.2 Princípios do *Lean Thinking*

Os princípios do *Lean* incentivam a remoção de resíduos. Os cinco princípios do *Lean* foram estudados pelos autores do livro *The Machine That Changed the World* e posteriormente em, *Lean Thinking Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation* (Womack & Jones, 1996). Os cinco princípios são os seguintes:

1. Valor

O valor só consegue ser definido pelo cliente e só tem sentido quando é expresso em termos que especificam o produto. O valor é criado pelo produtor e, segundo o ponto de vista do consumidor, este é a razão de os produtores existirem. Os produtores têm dificuldade em defini-lo, visto que necessitam de descobrir quanto o cliente está disposto a pagar pelo produto ou pelo serviço proposto (McCarthy, 2020).

2. Cadeia de Valor

A cadeia de valor é a identificação das etapas e das atividades executadas que trazem valor acrescentado para o cliente. A análise da cadeia de valor passa por três tarefas críticas:

- a) Resolução de problemas, desde o conceito até ao projeto detalhado e a engenharia para o lançamento de produção;
- b) Gestão de informação, em execução desde a receção do pedido até à entrega;
- c) Transformação de matérias-primas em produto acabado, e entregue ao cliente.

A cadeia de valor permite identificar atividades que eventualmente aumentam o valor. Existem ainda algumas atividades que não aumentam desperdício, mas também não aumentam valor, já que não existe tecnologia e processos atualizados.

3. Fluxo Contínuo

Após a criação da cadeia de valor para um produto específico e a eliminação de etapas que resultam em desperdício, deve-se estabelecer um fluxo contínuo sincronizando os recursos envolvidos na criação de valor. Esta forma de ligar os recursos resulta numa produção contínua, acrescentando valor ao processo e fluindo tudo da forma mais eficiente. A forma mais fácil de organizar os recursos é estabelecendo departamentos consoante a função, assim quando se é necessária a produção nestes departamentos, já existe especialização na matéria em questão (Samanta, 2019).

4. Sistema *Pull*

Depois de se estabelecer um fluxo contínuo, a produção inicia-se mais facilmente, tornando o processo de conceito - peça final mais rápido. O sistema *pull* ou sistema puxado ocorre consoante o pedido do cliente, logo só é produzido o que o cliente necessita, cumprindo o prazo de entrega. Este tipo de sistema permite à empresa não acumular *stock* de produto, uma vez que o produto só é produzido quando existe procura.

5. Perfeição

Após estipular uma cadeia de valores, um fluxo contínuo desta cadeia de valor e um sistema puxado, chega-se à fase de análise de todas as etapas anteriores. Ao analisar as etapas identificam-se mais desperdícios, até se chegar ao ponto de perfeição, onde não existem desperdícios.

A figura 2.2 apresenta o ciclo dos princípios da filosofia *Lean* que procura a eliminação de desperdícios e a criação de valor.

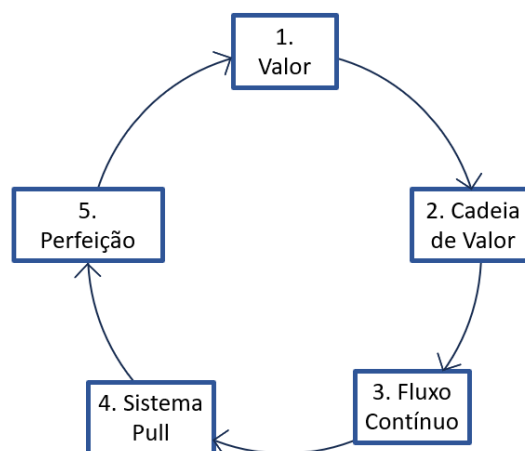


Figura 2.2 - Ciclo do *Lean Thinking*

Adaptado da (University of Cambridge, 2022)

2.1.3 Tipos de desperdícios

O desperdício segundo o dicionário português é o gasto inútil e censurável, esbanjamento ou perda. Segundo o *Lean*, desperdício ou *muda* (em japonês) são quaisquer atividades que não acrescentem valor ao produto ou serviço e que o cliente não está disposto a pagar (Douglas et al., 2015). Existem oito tipos de *mudas* (Leksic, et al., 2020) que ocorrem nas indústrias e que se passa a explicar:

1. Produção em Excesso

A produção em excesso significa produzir mais do que é necessário, mais rápido do que é preciso ou mais lento do que é preciso. Esta forma de desperdício é comum em sistemas *push*.

2. Tempo de Espera

O tempo de espera engloba todos os tempos gastos à espera de matérias-primas, peças inacabadas, retoques de peças, informação, ferramentas. Todos os tempos que interrompem o fluxo contínuo de produção e que provocam uma ineficiente utilização do tempo.

3. Transporte

O transporte é um desperdício visto que consome tempo e custos. Movimentações desnecessárias provocam este tipo de desperdício que se verifica quando existe um *layout* de produção inadequado ou uma zona de trabalho desorganizada.

4. Sobre processamento ou processamento inapropriado

O sobre processamento é todos os processamentos que não adicionam valor ao produto ou serviço. Os sobre processamentos podem ocorrer quando, por exemplo, um processo anterior foi inapropriado. Este desperdício é causado por políticas e por procedimentos e especificações insuficientes, por parte do consumidor.

5. *Stock*

O *stock* em excesso contraria o *JIT*, visto que o objetivo é produzir o necessário no momento certo. Quando existe *stock* em excesso, o momento pode não ter sido o certo ou as quantidades de produção podem não ter sido as corretas. O facto de se criar *stock* pode levar os produtos acabados a tornarem-se obsoletos. Este tipo de desperdício é característico da inexistência de sistemas de previsão ou fornecedores adequados.

6. Deslocação

A deslocação é todo o movimento realizado que não atribui valor ao produto. A deslocação em excesso de um operário ou o movimento desnecessário de uma máquina são desperdícios ligados ao movimento e ao tempo de espera. Este tipo de desperdício ocorre quando existe um *layout* inadequado ou falta de controlos visuais.

7. Produtos defeituosos

Os produtos defeituosos definem uma perda de valor de material porque, para se tornarem adequados, requerem reparação e trabalho adicional. A variação excessiva de processos de produção e de ferramentas ou de equipamento inadequados provocam estes desperdícios.

8. Subvalorização dos recursos humanos

A subvalorização dos recursos humanos dá-se quando o não existe um aproveitamento do potencial humano. Geralmente são estes que têm a criatividade para criar soluções e propor novas ideias bem como de propostas para o melhoramento do processo.

2.1.4 Ferramentas analíticas do *Lean*

As ferramentas e metodologias do *Lean* são vastas, recorrendo a ferramentas com um propósito eliminar o desperdício e de criar valor, aumentando a eficiência dos processos.

Neste subcapítulo são abordadas algumas ferramentas utilizadas no estudo de caso e também no presente estudo.

2.1.4.1 5S

O 5S é um programa que tem como intenção aperfeiçoar aspetos relacionados com a limpeza, organização, padronização e a disciplina. Permite cultivar um ambiente de trabalho limpo, organizado, ágil, produtivo e seguro.

Os princípios do 5S (Gapp, et al., 2008) permitem uma melhoria contínua e qualidade de trabalho e não são diferentes dos princípios para o crescimento humano e profissional. É um programa que é implementado para as empresas começarem a apresentar melhorias rumo à qualidade total.

O programa dos 5S é:

1) Utilização ou *Seiri*

A utilização é distinguir o que é útil na área de trabalho do que é inútil, dispensando o que é inútil.

2) Organização ou *Seiton*

A organização ocorre ao separar o necessário do desnecessário, que só ocupa espaço na área de trabalho.

3) Limpeza ou *Seisō*

A limpeza garante um local de trabalho sempre limpo. A aplicação de rotinas de limpeza cria um ambiente de trabalho mais limpo.

4) Padronização ou *Seiketsu*

A padronização permite a criação de padrões e o melhoramento dos princípios abordados anteriormente.

5) Disciplina ou *Shitsuke*

A disciplina garante que o padrão definido neste programa se mantém, sem a necessidade de supervisão.

Este tipo de ferramenta é aplicado em outros tipos de ferramentas como o MPT ou o *JIT* e provoca mudanças rápidas no sistema produtivo dos funcionários.

2.1.4.2 *Kaizen*

Kaizen é uma palavra japonesa que significa melhoria contínua e dá sentido à frase "hoje melhor que ontem e amanhã melhor que hoje". *Kaizen* é uma palavra formada pela palavra *Kai*, que significa mudança, e *Zen*, que significa virtude ou bondade. *Kaizen* é, portanto, a mudança para melhor, uma melhoria contínua para melhor (Rüttimann & Stöckli, 2016).

O objetivo de se aplicar diariamente o *kaizen* é focar-se na eliminação dos desperdícios, criando padrões e tendo locais de trabalho limpos e organizados. As melhorias ocorridas através do *kaizen* são geralmente pequenas e subtis, mas os resultados ao longo do tempo são grandes e duradouros (Ortiz, 2006).

A aplicação com sucesso desta filosofia pressupõe que todos os colaboradores envolvidos nas mudanças se encontrem a par do processo (Kato & Smalley, 2010). Todas as áreas podem adotar o *kaizen*, mas o objetivo principal são os pontos onde pode existir um maior retorno financeiro. As áreas onde pode ocorrer maior retorno financeiro são geralmente as que têm menor satisfação dos clientes, como, por exemplo, o desenvolvimento do produto.

De acordo com o *kaizen* (Liker & Convis, 2012), quando ocorre um problema que precisa de uma solução, os funcionários reúnem-se para uma discussão rápida (*brainstorming*), com o intuito de resolver o problema. Este tipo de filosofia propõe eliminar ideias fixas e convencionais e criar ideias, questionar as práticas e padrões e permite a mudança para melhor. Uma mentalidade positiva permite procurar novas ideias para a melhoria e a implementação de uma solução, que resolva um problema temporariamente e permite procurar soluções mais duradoras.

Para além destas propostas, o *kaizen* implementa reuniões diárias, que permitem solucionar certos problemas ou propor melhorias. Estas reuniões permitem uma melhor integração dos colaboradores no ambiente de trabalho, uma melhor qualidade de trabalho e lealdade à empresa que integram.

2.1.4.3 *Just-in-Time (JIT)*

O *Just-in-Time* ou *JIT* é uma das bases do TPS. É uma estratégia de inventário em que os materiais só são encomendados e rececionados quando são necessários num processo de produção. Para tal é necessário que uma empresa tenha uma previsão exímia dos seus serviços ou produtos.

O *JIT* é considerado uma estratégia puxada, visto que ocorre após as atividades de vendas. As vendas garantem a produção, o *stock* é "puxado" e assim são encomendados mais recursos para fabrico. Este método resulta num fluxo de produção suave com um custo de *stock* reduzido. Uma análise do tipo de clientes permite antecipar a produção de peças e a compra de mais recursos, sem que se crie muito *stock*. O *stock* deve existir apenas em quantidades necessárias para produzir o suficiente para o cliente.

As vantagens deste método são relacionadas com a redução do custo do *stock*. Visto que as áreas destinadas para o *stock* podem ser utilizadas para outros processos de produção, permitindo a diminuição de custos e o aumento dos lucros na organização.

2.1.4.4 *One Piece Flow*

O método de *One Piece Flow* é um processo de padronização do trabalho em linhas de montagem ou de produção, que tem como objetivo eliminar desperdícios. Resulta em produções maiores e melhores e com a utilização de menos recursos.

O método cria um sistema de produção em que, em cada setor existe somente o processo da peça necessária para o seguinte, e os materiais são processados à unidade e movidos de um processo para o outro continuamente. Na figura 2.3 é apresentado uma comparação entre o sistema tradicional de produção e o sistema *One Piece Flow*.

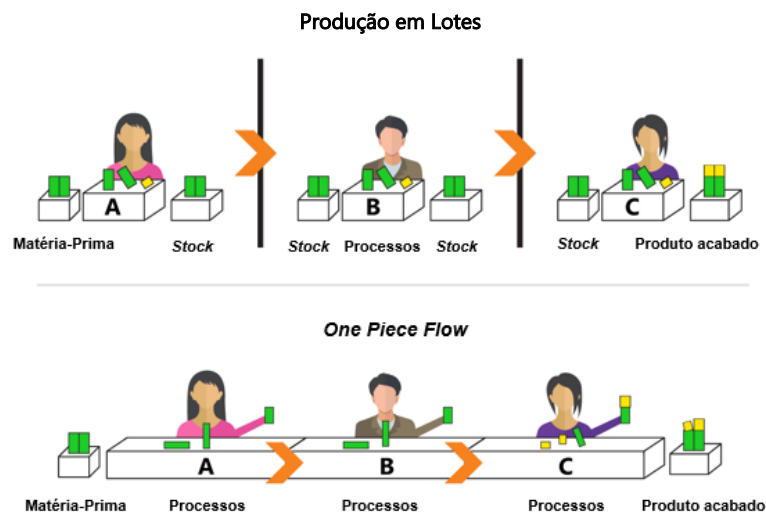


Figura 2.3 - Comparação entre sistema tracional e o sistema *One Piece Flow*

Adaptado de (Velki, 2023)

2.1.4.5 Manutenção Produtiva Total (MPT)

A Manutenção Produtiva Total ou MPT ou *Total Production Maintenance*, em inglês, foi uma metodologia criada originalmente pelo *Japan Institute of Plan Maintenance (JIPM)*. Esta filosofia "tem como grande objetivo a redução dos custos da produção. Tem como base a determinação da melhor taxa de utilização do equipamento, tendo em linha de conta o rendimento e os custos em termos de ciclo de vida" (Cardoso, 1999). A casa da filosofia MPT encontra-se apresentada na figura 2.4. A figura permite-nos perceber que a MPT é sustentada por vários alicerces.

A Manutenção Autónoma, que tem como base o processo de consciencialização e treino dos operadores de forma que sejam responsáveis pelo seu equipamento bem como por tarefas simples de manutenção do mecanismo.

A Manutenção Planeada é a "Manutenção efetuada a intervalos de tempo pré-determinados, ou de acordo com critérios prescritos, com a finalidade de reduzir a probabilidade de avaria ou de degradação do funcionamento de um bem." (IPQ, 2007). Tem como base a programação de intervalos de tempos ou de critérios de forma a reduzir avarias. Segundo Sacristán este tipo de manutenção é a única forma de assegurar a continuidade de trabalho.

A Melhoria Específica são atividades que são desenvolvidas para maximizar a eficiência global dos equipamentos e diminuir os desperdícios nas empresas. Este pilar permite identificar todas os desperdícios que estão a ocorrer.

A Manutenção de Qualidade propõe atividades que procuram estabelecer e manter as condições básicas do equipamento tentando evitar defeitos da qualidade. A manutenção do equipamento no estado perfeito impede a diminuição da qualidade de produto. A qualidade do produto deve ser analisada periodicamente, bem como a qualidade das máquinas.

A Educação e Treino consiste em treinar e capacitar os funcionários no seu local de trabalho. Ao treinar os funcionários é preciso educá-los a executar tarefas diárias, com o uso de ferramentas e materiais que lhes possibilitem e passíveis de manutenção.

O Controlo inicial permite gerir o desenvolvimento dos novos produtos e processos, resultando numa construção de produtos mais fáceis de produzir e de ferramentas e máquinas mais fáceis de operar.

O MPT Administrativo é a aplicação do MPT não apenas ao nível dos operadores, mas também a nível administrativo, visto que esta filosofia é baseada na proatividade e na melhoria contínua.

A Segurança e Higiene no trabalho é o último pilar do MPT. No que respeita à saúde humana é o que mais importa, uma vez que o objetivo é evitar acidentes de trabalho e manter o posto de trabalho limpo.

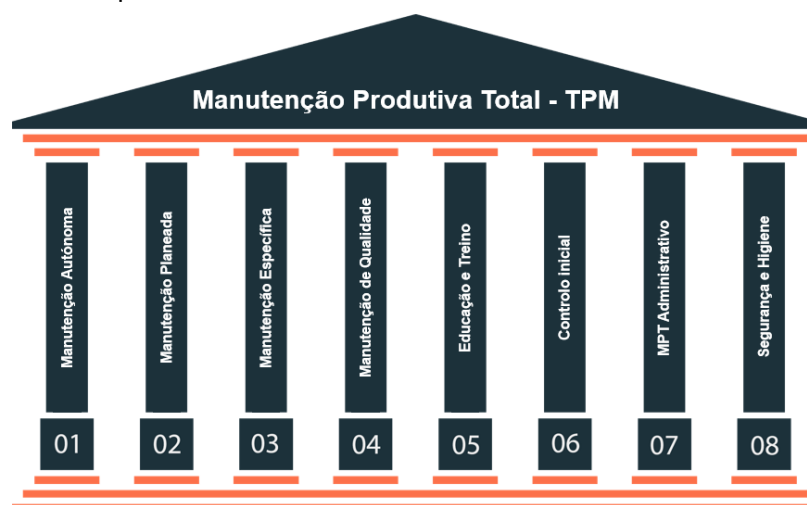


Figura 2.4 - Casa do MPT

Adaptado de (Augmentir, 2021)

2.2 Outras metodologias

2.2.1.1 3C's

A ferramenta dos 3C's representa as palavras Caso, Causa e Contramedida. "Caso" consiste em definir e quantificar o problema existente; causa, procurar todas as prováveis causas desse problema; e contramedida, delinear soluções para a resolução desse problema. Após a implementação da solução procede-se à verificação da resolução. Na figura 2.5 encontra-se um exemplo da tabela que permite identificar a solução do caso.

1. Caso	2. Causas
4. Verificação	3. Contramedidas

Figura 2.5 - Ferramenta dos 3C's

2.2.1.2 5W's

A ferramenta dos 5W's ou os 5 Porquês é utilizada para resolução de problemas e para melhoria de processos, no entanto, é mais eficaz quando se utiliza para a solução de problemas simples. Esta ferramenta permite determinar a causa-raiz dos problemas colocando repetitivamente a pergunta "Porquê?" (cinco vezes).

Esta ferramenta é bastante semelhante à ferramenta dos 3Cs e pode responder a problemas que a ferramenta dos 3Cs não soluciona.

As etapas para utilizar esta ferramenta são:

1. Identificar e definir o problema a analisar, tendo em conta todos os fatores ligados a este;
2. Colocar a questão "Porquê?" de o problema ter ocorrido. A resposta apresentada deve ser anotada;
3. Se a resposta dada não for a causa-raiz, deve repetir-se a etapa 2;
4. Repetem-se as etapas 2 e 3 cinco vezes até se determinar a causa-efeito;

Na figura 2.6 encontra-se o esquema desta ferramenta.

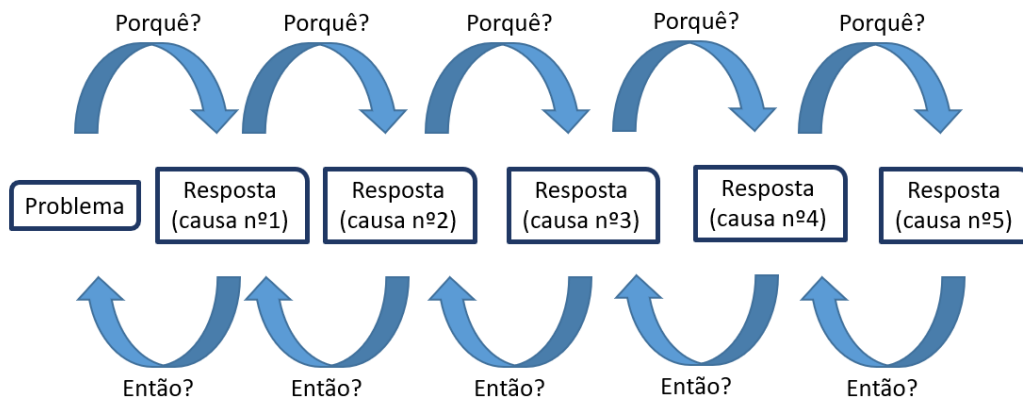


Figura 2.6 - Exemplo da ferramenta dos 5 Porquês

2.2.1.3 Fluxograma

O Fluxograma é uma ferramenta de apoio à esquematização de um processo, representando todas as etapas através de uma sequência operacional e informando tudo o que é realizado. Este tipo de diagrama permite informar todos os operadores através de uma língua universal, e melhorar os processos definindo uma sequência de etapas, sendo possível determinar-se o que é etapa e o que é desperdício.

Na figura 2.7 encontra-se um exemplo de fluxograma, e na tabela 2.1 a linguagem universal dos fluxogramas. Os símbolos utilizados podem ser divididos em representativos operacionais, de ramificação e controlo do fluxo, entrada e saída, armazenamento de arquivos e informações e processamento de dados. Os símbolos apresentados na tabela 2.1 apresentam cada uma destas divisões.

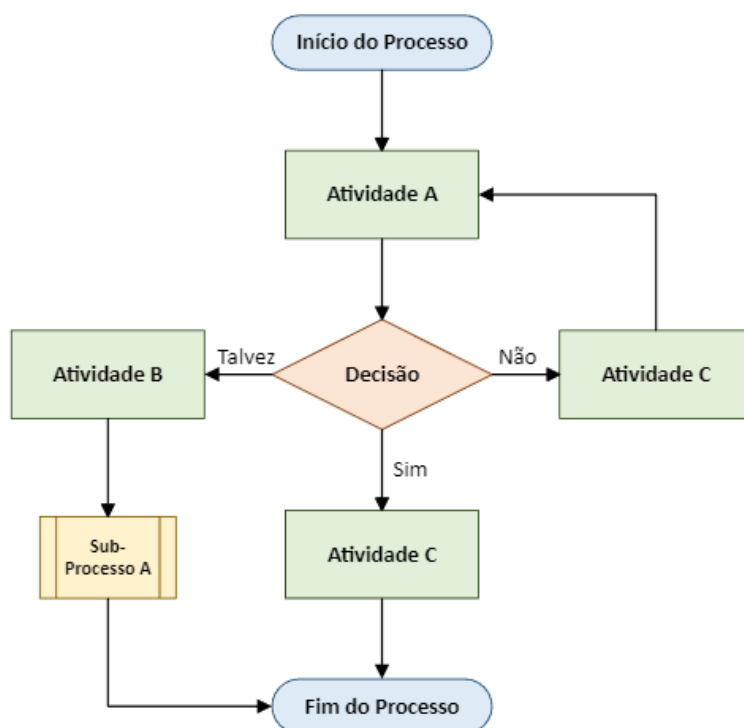


Figura 2.7 - Exemplo de Fluxograma

Tabela 2.1 - Simbologia utilizada nos Fluxogramas

(Microsoft, 2021)

Nome	Símbolo	Função
Início/Fim		Representa o início ou fim do processo.
Processo		Representa uma etapa do processo, onde ocorre uma ação.
Decisão		Representa um ponto onde existe uma decisão sobre algo.
Sub-processo		Representa outro conjunto de etapas que integra o subprocesso.
Documento		Representa uma etapa que acaba num documento
Seta		Representa a direção e sentido do processo.
Dados		Representa informações retiradas de fora do processo ou a ser transmitidas para outros processos.

3 INTRODUÇÃO À IMPRESSÃO 3D

A impressão 3D ou fabricação aditiva é um tipo de tecnologia que está em evolução. É uma tecnologia identificada pela velocidade de produção de peças complexas e daí ser fator utilizada, muitas vezes, para a produção de protótipos. Como a fabricação aditiva está em constante evolução, tendo sido criado vários tipos de variantes recentemente, esta tecnologia já começou a ser utilizada para produzir peças finais que são vendidas ao consumidor.

3.1.1 Conceito

A manufatura aditiva (MA) (Gibson, et al., 2015) baseia-se no processo de criar peças, componentes ou montagens através de um ficheiro digital, *stl*. Este ficheiro é convertido a partir de um ficheiro de *CAD*, tal como o *SolidWorks* e o *IronCAD*. O ficheiro *stl* ou, em inglês, *Standard Tessellation Language* é um ficheiro digital que descreve o *layout* tridimensional de um objeto e utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) para as superfícies do objeto através de formas geométricas triangulares, como se encontra representado na figura 2.9. A conversão do ficheiro *stl* (France, 2014) é realizada conforme a qualidade da peça, sendo esta conversão precária, para peças em que a qualidade superficial não é requisitada, ou muito detalhada, para peças que requerem uma qualidade superficial e uma tolerância apertada. Esta comparação encontra-se ilustrada na figura 2.9.

Este ficheiro *stl* é utilizado seguidamente em aplicações conhecidas como *slicers* (France, 2014) que dividem o objeto por camadas e criam estruturas de apoio à impressão. Outros tipos de *slicers* fazem a orientação da peça e o *layout* da impressão. Estas camadas são o ponto mais importante da MA visto que cada camada é uma seção transversal da peça do ficheiro

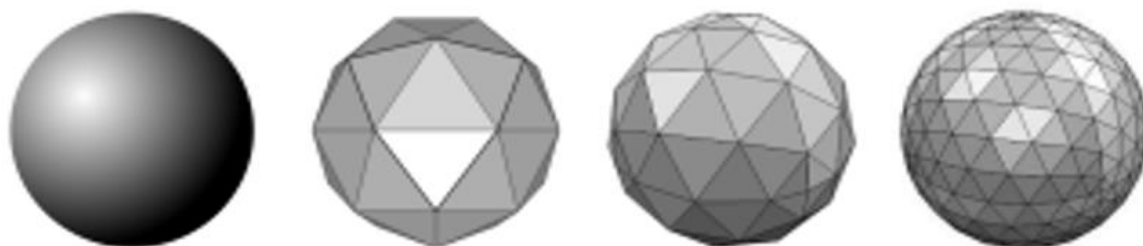


Figura 3.1 - Conversão do ficheiro CAD para stl

Adaptado de (Mouris, et al., 2020)

stl. Parâmetros como a espessura das camadas, a orientação e o local onde a peça é impressa podem comprometer certos comportamentos mecânicos que seriam pretendidos para as peças.

Após estruturação e a confirmação da impressão, imprime-se o objeto através de uma impressora 3D. Conforme o tipo de tecnologia utilizado (France, 2014), pode ser necessária a utilização de processos pós impressão que façam a peça ficar conforme o pretendido. O processo do fabrico aditivo encontra-se ilustrado na figura 2.10 e representa as quatro etapas principais do processo.

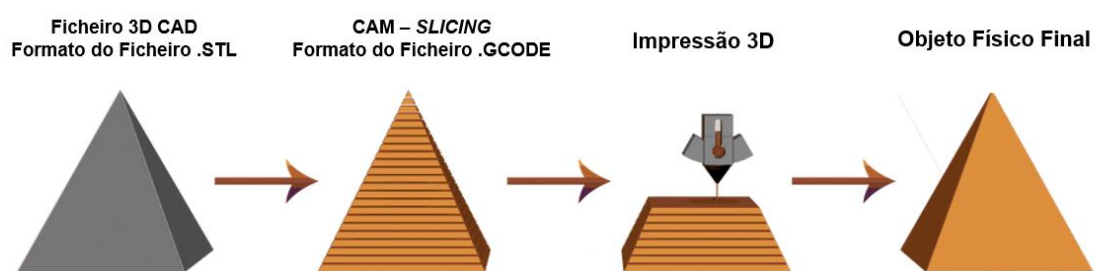


Figura 3.2 - Processo de fabrico aditivo

Adaptado de (My3DConcepts, 2017)

A tecnologia destas impressoras evoluiu ao longo dos anos (Jordan, 2018), existindo já impressoras que utilizam metais e compósitos de metais para imprimir peças com comportamentos mecânicos superiores a peças feitas através de maquinação.

3.1.2 História da impressão 3D

A impressão 3D foi um tipo de tecnologia em que o procedimento para a impressão foi criado antes da tecnologia, o procedimento desta foi inicialmente descrito em 1945 por Murray Leinster no seu livro de ficção científica "Things Pass By". Este descrevia a tecnologia como "eficiente e flexível", alimentada por "plásticos magnetrônicos", através de um "braço móvel". A impressora fazia "desenhos no ar seguidos de desenhos", "que examina com fotocélulas. Mas o plástico sai da ponta do braço desenhador e endurece há medida que vem... seguindo apenas de desenhos" (Leinster, 1945).

Antes da criação de uma impressora 3D funcional ocorreu uma corrida às patentes, de tal forma que, em 1971, Johannes F. Gottwald criou uma patente (US 3596285A) (Gottwald, 1971) para um dispositivo de material metálico, que injetava continuamente de forma a fabricar metal removível de uma superfície reutilizável. Esta patente foi a primeira a descrever a manufatura aditiva como uma fabricação controlada por desenhos e que permitia uma prototipagem rápida. A figura 3.3 demonstra o mecanismo que confirma a patente US 359285A. Foi

David E. H. Jones o primeiro a explicar o conceito de impressão 3D na revista New Scientist em 1974.

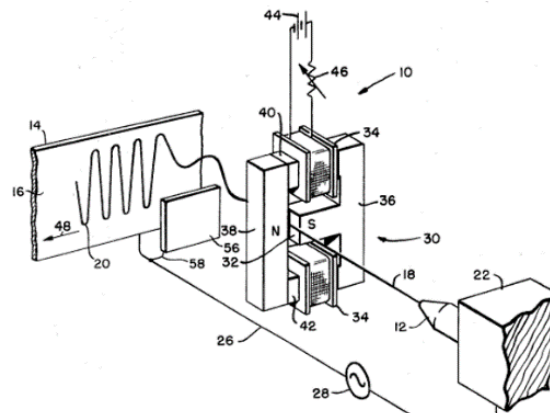


Figura 3.3 - Mecanismo da patente US 3596285A

(Gottwald, 1971)

Na década dos anos 1980 iniciou-se a construção das primeiras impressoras 3D. Em 1980, Hideo Kodama foi o primeiro a inovar, criando dois tipos de métodos aditivos capazes de fabricar peças tridimensionais através de um polímero termo fixo fotoendurecível, em que a camada de impressão era controlada através de uma luz UV, que emitia luz conforme a área de impressão, e a existência de um aparelho que empurrava este polímero de forma a varrer os excessos. Em 1981, Hideo Kodama tentou registrar uma patente (JP S56-144478) para o mecanismo de movimentação XYZ mas, devido ao orçamento insuficiente, não o conseguiu. Em 1982, nos Estados Unidos da América, foi desenvolvido uma patente (US 4323756) que descrevia como se utilizam camadas de metal em pó e fontes de energia a laser para fabricar artigos sobre um substrato. Mas, foi em 1984, que o empresário Bill Masters registou a primeira patente que criou os alicerces para os sistemas de impressão 3D utilizados atualmente. Esta patente descrevia o processo de impressão 3D (Masters, 1987), que Bill Masters descreveu como sistema CAMPS. Na patente é referido que " Um processo e sistema de fabricação automatizado por computador (CAMPS) inclui um sistema de computador que consiste em um projeto auxiliado por computador e um controlador de máquina que recebe um arquivo de informações de coordenadas." (Masters, 1987). Para além desta patente, no mesmo ano, três inventores franceses desenvolveram uma patente que regista o processo de estereotipografia.

Outro passo significativo na história da fabricação aditiva deu-se no ano 1984, em que Chuck Hull, com uma patente que inicialmente fora arquivada, mas que contribuiu imenso para a evolução desta tecnologia, criou o formato de arquivo stl. Após 2 anos esta patente foi-lhe atribuída. No final dos anos 80 desenvolveram-se as primeiras máquinas de extrusão plástica, conhecidas atualmente como máquinas FDM, em inglês, *fused deposition modeling*. Estas

foram comercializadas pela empresa *Stratasys*, em 1992. Nos anos 80 obter uma máquina de impressão 3D era muito dispendioso, registando-se o preço destas acima dos 640000€.

Nos anos 90 desenvolveram-se processos com metais. O processo de manufatura aditiva de metais de sinterização seletiva a laser (DMLS) foi o tipo de tecnologia que teve maior impacto, visto que, na época, só se utilizava processos não-aditivos, como a fundição, a maquiagem e a estampagem. Este tipo de processo, DMLS, era semelhante aos outros utilizados para os plásticos. Baseava-se numa cabeça que se movia e, conforme o padrão da peça, esta transformava o material na forma desejada.

A partir dos anos 2000 a impressão 3D foi evoluindo (Mpofu, et al., 2014), tendo sido utilizada para várias indústrias devido à sua praticabilidade e velocidade de execução e também por se ter tornado mais acessível às pessoas.

3.1.3 Variantes da Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva pode variar conforme o tipo de processo utilizado. Cada processo tem as suas variáveis e as suas limitações. Os processos mais comuns são os que se encontram seguidamente apresentados.

3.1.3.1 Fused Deposition Modeling - FDM

O processo de FDM, como foi referido na secção anterior, foi o processo mais recente a ser teorizado e comercializado, apesar de ser o mais simples e o mais acessível de todos. O FDM caracteriza-se por ser um método de extrusão do material através de um bocal, que se une para criar objetos 3D. Na maioria das vezes, este processo utiliza como material para a impressão filamentos termoplásticos, que geralmente se encontram enrolados numa bobina.

O processo inicia-se com o filamento (a) que é puxado pelo bocal aquecido (b) que vai depositando em camadas o material derretido de forma a chegar à forma pretendida (c). A plataforma (e) desce por cada deposição de camada de material. Para algumas peças existe a necessidade de imprimir estruturas (d) que permitem a estabilidade da impressão.

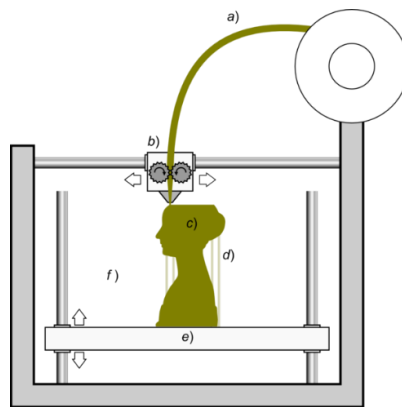


Figura 3.4 - Tecnologia FDM

(Martinelli, 2019)

3.1.3.2 Stereolithography - SLA

O SLA (formlabs, 2022) é uma tecnologia que produz peças isotrópicas, impermeáveis e de alta precisão. A estereolitografia ocorre através de processos fotoquímicos e é comumente conhecida como impressão 3D em resina. As impressoras, figura 3.4, que utilizam esta tecnologia são constituídas por uma fonte de luz - um laser ou projetor - para curar resina líquida em plástico endurecido, uma plataforma de construção e a resina. "Quando as resinas SLA são expostas a certos comprimentos de onda de luz, as cadeias moleculares curtas se unem, polimerizando monômeros e oligômeros em geometrias rígidas ou flexíveis solidificadas" (formlabs, 2022).

O processo da impressão SLA (formlabs, 2022) ocorre através da cura da resina (3). Através da fonte de luz, este fornece energia (5) para induzir a reação química. A luz é emitida consoante o padrão da camada (1) e, após a cura, a plataforma de impressão (4) sobe. Após uma breve cura, a plataforma volta a descer para começar uma nova camada de impressão. Para este tipo de tecnologia, geralmente é necessário a utilização de suportes (2).

Após a impressão com este tipo de tecnologia, é habitual serem necessários tratamentos como a limpeza e uma pós-cura.

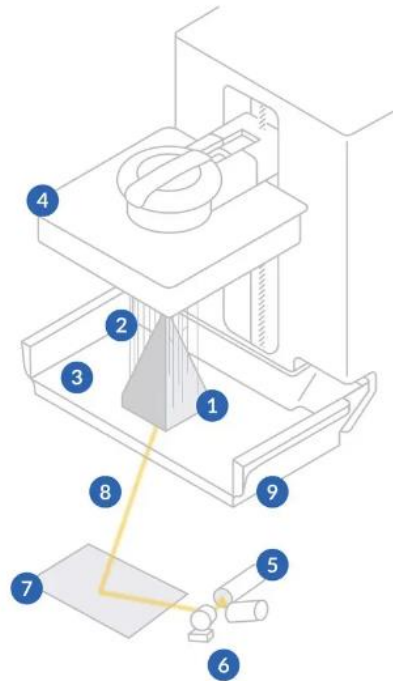


Figura 3.5 - Tecnologia SLA

(formlabs, 2022)

3.1.3.3 Selective Laser Sintering - SLS

A tecnologia SLS (formlabs, 2022) tem sido a tecnologia com maior influência na área da manufatura aditiva. A sua produção elevada, o baixo custo por peça e a qualidade do material relevam para a sua importância. A evolução desta tecnologia permite atualmente a utilização de compósitos em pó de Nylon com Fibra de Carbono e a possibilidade de recuperação de pó que não foi utilizado para a impressão.

Uma impressora SLS (formlabs, 2022) é constituída por um laser de alta potência (8), que consiga sintetizar pequenas partículas de pó de polímeros em estruturas sólidas, um dispositivo que permita dispersar o pó (5), pó (3) e uma câmara onde se imprime a peça (2). A impressão inicia-se com o pó a ser disperso numa camada fina, seguidamente a impressora pré-aquece o pó através dos seus aquecedores (1). O laser expõe a secção do modelo 3D e funde o pó que faz essa secção. Todo o pó que não foi fundido funciona como estrutura da peça, não havendo a necessidade de estruturas dedicadas para apoio. Após a impressão de uma camada, a câmara desce e é espalhado pó, repetindo-se o mesmo ciclo.

Quando a impressão termina, esta tecnologia requer que se retire o pó não utilizado, permitindo que se recupere o material não utilizado.

O DMLS ou *Direct Metal Laser Sintering* em inglês é a tecnologia que equivale à SLS, mas que usa metal como objeto de impressão.

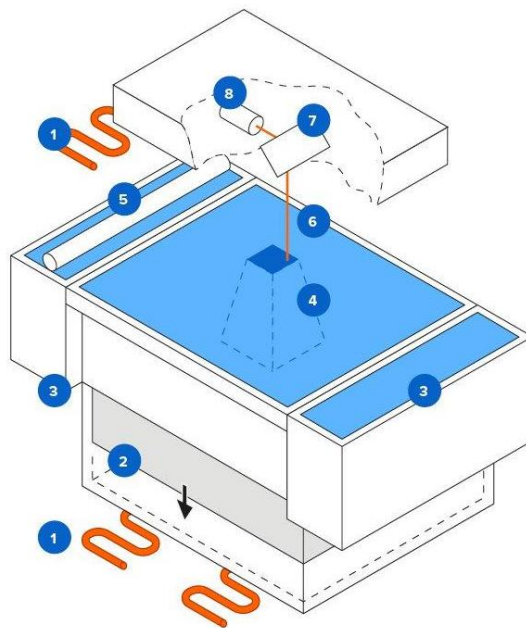


Figura 3.6 - Tecnologia SLS

(formlabs, 2022)

4 ESTUDO DE CASO

A presente investigação ocorreu na empresa Eugster/Frismag, na área de Engenharia e Projeto, onde se encontra a investigação da impressão 3D de moldes. Esta investigação permite a aplicação de moldes impressos em 3D nos processos utilizados na fábrica.

4.1 Grupo Eugster/Frismag

"O grupo Eugster/Frismag AG define os seus valores e fatores de sucesso para todos os funcionários como um guia para as suas ações" (Eugster/Frismag, 2014). O grupo pretende implementar a filosofia *Lean*. Desta forma tem uma filosofia empresarial versátil e sofisticada procedendo a alterações internas e externas mediante os problemas que surgem.

O grupo assenta em valores como o respeito, a transparência e a apreciação. Estes valores encontram-se ramificados e constituem-se como códigos de conduta na empresa. A figura 4.1 demonstra os valores em que a empresa se baseia.

Os códigos de conduta do grupo englobam todos os participantes da empresa, desde os *trainees* aos clientes. Estes garantem que as empresas associadas ao grupo sejam abordadas com respeito e tolerância e que partilhem toda a experiência, de forma a chegar a um acordo de sucesso. Relativamente aos colaboradores, estes têm a mesma importância que os parceiros, não existindo discriminação e oferecendo locais de trabalho seguros e saudáveis. Isto inclui preparação regular para situações de emergência, com treino e formações de primeiros socorros e de prevenção de fogos. Para além destas formações, o grupo proporciona ações de formação em outras áreas, tais como línguas estrangeiras (Inglês, alemão e mandarim), gestão, trabalho de equipa e segurança no trabalho.



Figura 4.1 - Valores do grupo Eugster/Frismag AG

(Eugster/Frismag, 2014)

O grupo apoia todos os clientes com recursos tecnológicos, sociais, e inovação orientada a processos. A Eugster/Frismag AG esforça-se por garantir a melhor qualidade aos clientes, testando os seus produtos, e sendo certificada em qualidade.

4.1.1 Contexto histórico

A Eugster/Frismag AG foi criada em 1976 por Arthur Eugster em Romanshorn, na Suíça. Inicialmente não produzia máquinas de café. Na época produzia pequenos eletrodomésticos, como máquinas de cozer ovos e máquinas de produção de *waffles*. Tinha apenas 12 funcionários. Em 1978 fundou a Frismag AG em conjunto com o seu irmão, Markus Eugster, e inicia-se a montagem de máquinas de café.

Em 1989, cria-se a primeira subsidiária internacional, situada em Portugal, a Eugster & Frismag Eletrodomésticos Lda., em Torres Vedras. Nesta cria-se uma linha de montagem de máquinas de café.

Em 1990, a empresa estabeleceu uma fábrica de produção de eletrodomésticos em Jona, Suíça.

Em 1994, e após dois anos de desenvolvimento, iniciou-se a produção de máquinas de café totalmente automáticas e ano depois, em 1995, as empresas Eugster e Frismag unem-se, formando o grupo Eugster/Frismag AG.

No ano de 1997, inicia a montagem de máquinas de filtro de café em Shenzhen, China, e, em 1998, passa a ter uma instalação para o desenvolvimento e pré-montagem de máquinas de café, que se localiza em Romanshorn, Suíça.

A partir de 1998 ocorreu uma expansão da empresa, criando novas instalações e reafirmando novas associações.

4.1.2 Enquadramento empresarial

Os serviços prestados pelo grupo "são caracterizados pela inovação técnica, social e orientada para o processo" (Eugster/Frismag, 2022). O grupo presta os serviços demonstrados na figura 4.2

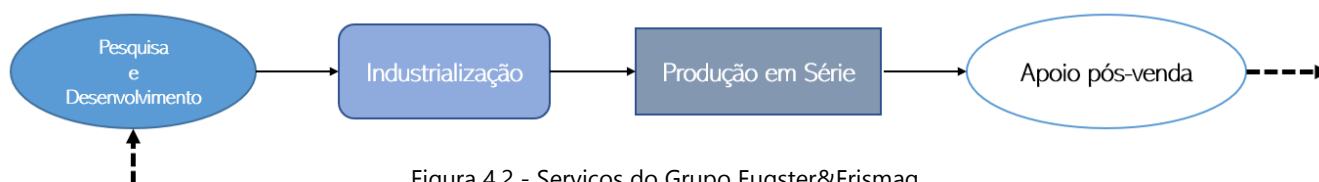


Figura 4.2 - Serviços do Grupo Eugster&Frismag

Adaptado de (Eugster/Frismag, 2022)

O grupo é, atualmente, líder no mercado no fabrico de máquinas de café para a *Nespresso*, produzindo 95% das máquinas da marca. Para além da *Nespresso*, fabrica máquinas para a *Jura*, *Melitta* e *Nivona*. Este feito é fruto de pesquisa e de desenvolvimento. A pesquisa continua pelas tendências, o desenvolvimento dos aparelhos eletrónicos mais recentes e o desenvolvimento do design dos produtos torna a empresa o fabricante pretendido por várias marcas.

As equipas de gestão industrial e as equipas especializadas em industrialização são responsáveis pelo desenvolvimento do produto orientado para a produção em série. Aplicando processos de eficiência de produção e a filosofia *Lean* conseguem-se resultados na qualidade do produto e na conclusão da produção dentro do tempo pré-determinado com os clientes.

Após a validação da industrialização inicia-se o fabrico dos produtos em série. O processo montagem ocorre, na sua maioria, através da mão humana, apesar de alguns processos requererem a automatização e robotização.

O pós-venda é o serviço final que apoia os clientes. Muitas vezes este serviço informa sobre a qualidade das peças e dá o *feedback* de satisfação dos clientes.

4.2 Eugster & Frismag Portugal

A Eugster & Frismag Lda foi formada em 1989, como referido na secção 4.1.1. Esta fábrica encontra-se presentemente em Torres Vedras, figura 4.3, e é responsável pela produção e montagem de máquinas de café para marcas como a *Jura* e a *Melitta*. As máquinas de café produzidas pelo grupo são, na sua maioria, máquinas de café que trituram o grão de café. Estas máquinas são constituídas por cerca de 800 peças de plástico e por motores. A produção de máquinas de café pode chegar às 600 unidades, de cada modelo que é produzido na fábrica, por dia.



Figura 4.3 - Eugster & Frismag Lda

(Eugster/Frismag, 2022)

Como existe uma necessidade de produção de máquinas de café bastante elevada é necessário a produção de peças de plástico internamente na empresa. Após a produção de todas as peças de plástico monta-se as máquinas de café em unidades de montagem.

4.2.1 Unidade de Produção de Plásticos

As unidades de produção de plásticos constituem metade do espaço da Eugster & Frismag Lda e encontram-se a produzir peças de plástico todos os dias da semana durante todo o dia, estas unidades são constituídas por máquinas de impressão de plásticos como a apresentada na figura 4.4 e por colaboradores que operam com estas máquinas.

Na área de produção de plásticos também existe uma equipa de engenharia que corrige problemas relacionados com moldes ou projeta novos moldes para futuras máquinas de café a ser produzidas.

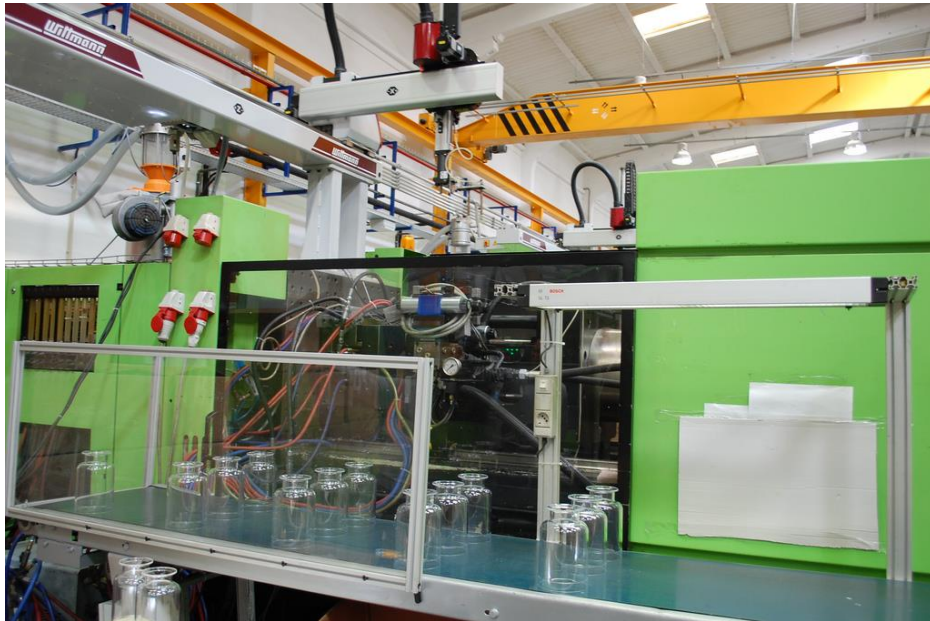


Figura 4.4 - Produção de plásticos numa unidade de produção

4.2.2 Unidade de Montagem

Para cada tipo de máquina de café produzida na empresa, existem várias linhas de montagem associadas a essa máquina, a linha geral, que monta a máquina de café desde o início até ao fim, mas que recebe outras montagens pelo caminho como por exemplo a montagem do motor, na figura 4.5 encontra-se apresentada uma linha de montagem.



Figura 4.5 - Linha de montagem de máquinas de café

As linhas de montagem incorporam os princípios *Lean*, aplicando o conceito *one piece flow* na montagem das peças da máquina, o fornecimento das peças à produção é apoiado pela filosofia JIT e não existe peças em *stock*. Para que se reduzir o tempo desperdiçado em transportes e movimentos, existem vários pontos de quantidade reduzida de *stock*, que são designados no estudo de caso como "supermercados" onde as várias peças utilizadas na linha de montagem são armazenadas. Também nas linhas de montagem encontram-se ferramentas do *Lean* como instruções de trabalho e matrizes de competências. Estas ferramentas adicionais permitem organizar e instruir os colaboradores que se encontram no seu posto de trabalho, mas também permite identificar as competências a melhorar que cada colaborador necessita.

Na unidade de Montagem existem gabinetes ligados à qualidade, à engenharia industrial, à previsão e à engenharia. O Gabinete de Equipamentos de Produção ou GEP foi onde este estudo de caso ocorreu.

4.2.2.1 Gestão de Equipamentos de Produção

O GEP é gerido como se encontra apresentado na figura 4.6 encontram-se quatro equipas presentes no GEP, a equipa da LCIA ligada à automação e criação de máquinas novas, a equipa elétrica ligada a todas as partes elétricas nas máquinas e ferramentas que são utilizadas nas linhas de montagem, a equipa mecânica que intervém na criação de vários protótipos e de estruturas para novas linhas de montagem e a equipa de Montagem/Manutenção que se encarrega de toda a manutenção das linhas de montagem e da unidade de montagem bem como da montagem de novas linhas de montagem.

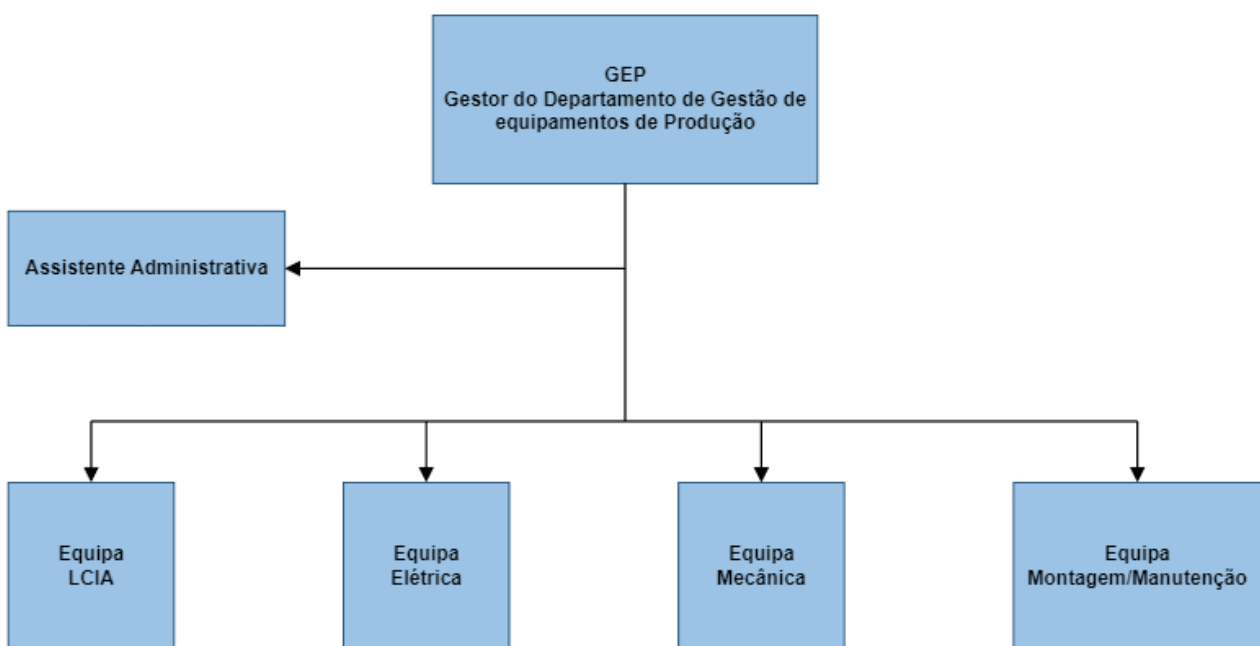


Figura 4.6 - Organograma do GEP

O GEP é o gabinete que se encontra mais ligado às linhas de montagem, sendo o primeiro a interagir quando ocorre um problema e o primeiro a iniciar um projeto de uma peça ou máquina nova. Também é no GEP que se encontram as máquinas que permitem a fabricação aditiva, este conjunto é comercializado pela empresa *FormLabs*. Este conjunto é constituído pela impressora *Form 3L* (figura 4.7), a máquina de lavar *Wash L* (Figura 4.8) e a curadora *Cure L* (Figura 4.9).



Figura 4.7 - Impressora da FormLabs - Form 3L

(formlabs, 2022)



Figura 4.8 - Máquina de Lavar da FormLabs - Wash L

(formlabs, 2022)



Figura 4.9 - Curadora da FormLabs - Cure L

(formlabs, 2022)

Este conjunto permite a impressão de peças com um volume de 33.5 x 20 x 30 centímetros, segundo a *FormLabs*. Sendo uma peça com esta dimensão capaz de ser inserida na máquina de lavar e na curadora sem se ter de alterar a mesma.

Para além deste conjunto a *FormLabs* fornece *slicer* próprio que permite facilitar a impressão, este *slicer*, *PreForm* (figura 4.10), permite configurar a quantidade de suportes, densidade e tamanho, o tipo de jangada de suportes, o *layout* de impressão e a orientação da peça.

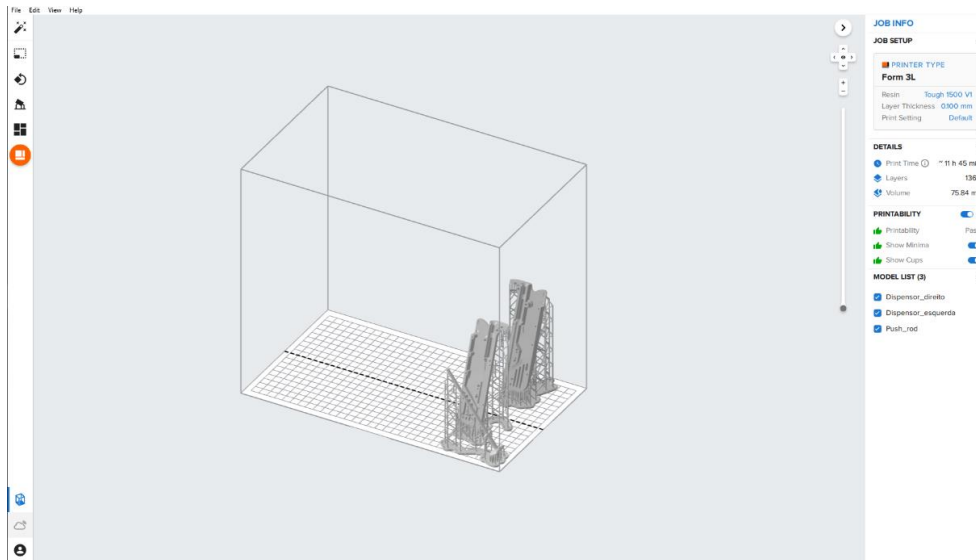


Figura 4.10 - Exemplificação do PreForm

Para além destas configurações o PreForm altera o tamanho de camadas conforme o tipo de resina utilizada, visto que existem certas resinas que só permitem uma espessura de 0.05mm de camada enquanto existem outras que permitem 0.1 mm e 0.05mm de camada. O *slicer* também refere o tempo estimado de impressão, o volume de resina utilizado e a quantidade de camadas impressas.

4.3 Identificação de problemas e oportunidades de melhoria

Neste capítulo aborda-se a identificação da tecnologia e os problemas relativos à MA do estudo de caso.

Para identificar os principais problemas que ocorrem na empresa foi iniciada uma auditoria 5S que tem como objetivo determinar as oportunidades de melhoria e quantificar o estado da integração da impressão 3D na empresa. Foram avaliados vários parâmetros de 1 a 5, sendo o 1, o parâmetro que nunca ocorre, ou seja, o parâmetro que necessita de uma melhoria mais urgente, e o 5, o parâmetro que ocorre sempre.

Tabela 4.1 - Primeira auditoria 5S

Auditoria 5S - Check List								
Nome do auditor: Miguel Faria					Data: 25/05/2022			
Legenda								
1 - Nunca se verifica 2 - Raramente se verifica 3 - Verifica-se às vezes 4 - Verifica-se muitas vezes 5 - Verifica-se sempre								
5s	Nº	Parâmetro de Avaliação	Nível					Comentários
			1	2	3	4	5	
1º: Senso: Utilização (Seiri)	1.1	Presença de material danificado.		x				Tanques de resina
	1.2	Presença de material sem utilidade.		x				Cartuchos de resina
	1.3	Presença de material de limpeza.			x			Panos de microfibra, limpa-vidros, álcool isopropílico, ...
2º: Senso: Organização (Seiton)	2.1	Presença de materiais, equipamentos desorganizados.			x			Equipamentos de apoio à impressão
	2.2	Presença de informação relevante na área de trabalho.		x				Sala de reuniões
	2.3	Existência de locais de armazenamento bem identificados e definidos.	x					Armários, locais ventilados
	2.4	Existência de locais de circulação de pessoas e transportadores sem perigo.		x				Sala de reuniões
	2.5	Existência de placas de identificação dos equipamentos.					x	Etiquetas nos equipamentos
3º Senso: Limpeza (Seisō)	3.1	As paredes envolventes, o piso e o teto encontram-se limpos e em bom estado.					x	Sem vestígios de resina, álcool, ...
	3.2	Locais de armazenamento encontram-se limpos.					x	
	3.3	Presença de equipamentos contaminados por resina.			x			Tesouras, tank tool, ...
	3.4	Área da MA encontra-se limpa.			x			Sem vestígios de resina, álcool, ...
	3.5	Presença de fugas de resina ou álcool.	x					Reservatório de álcool, ...
4º Senso: Padronização (Seiketsu)	4.1	Os materiais estão armazenados nos respetivos locais		x				Armários, locais ventilados
	4.2	Os utensílios encontram-se identificados de forma clara.	x					Tesouras, tank tool, ...
	4.3	Existe organização e limpeza da área da MA.				x		Sem vestígios de resina, álcool, ...
	4.4	Existe de um plano de acompanhamento.					x	Quadro 5S, Indicadores,
5º Senso: Disciplina (Shitsuke)	5.1	Todos os trabalhadores têm conhecimento de como operar com uma MA.			x			Utilização do slicer, manutenção básica, Matriz de competências, ...
	5.2	Desenvolve-se desenhos assistidos por computador através de softwares CAD.					x	IronCad, Solidworks, ...
	5.3	Integra-se impressões no âmbito do Desing for Additive Manufacturing		x				Peças produzidas que utilizam menos material e demorem menos tempo
	5.4	Utiliza-se a MA para prótipos, peças de substituição ou peças finais.			x			Para as linhas de montagem e para linhas de produção
	5.5	A MA encontra-se gerida adequadamente.			x			Integração na tempo de resposta vs necessidade
	5.7	Utiliza-se indicadores para analisar o impacto da implementação da MA.					x	3C, Kaizen, ...
	5.8	Os padrões encontram-se e melhoria contínua					x	

Analisando a tabela 4.1, observa-se que vários parâmetros têm a pontuação abaixo do valor médio de 3,125, ou seja, nível 3. Desta forma, estes parâmetros contribuem para oportunidades de melhoria.

No processo de impressão existem problemas que têm que ser estudados, problemas relacionados com a MA, isto é, problemas relacionados com o processo, local onde se localiza, instrução dos colaboradores.

4.3.1 Processo de Projeto

A manufatura aditiva de objetos 3D utilizando a tecnologia SLA é baseada na cimentação controlada, através de um processo fotoquímico da resina, utilizando o feixe de luz de um laser controlado por um computador. Este feixe de luz cria um padrão iluminando a resina, criando a peça camada a camada.

Num estado inicial a resina é solidificada de forma que esta adira à plataforma de impressão. Esta solidificação ocorre até certa profundidade, que pode ser alterada, e faz com que o objeto impresso não se solte da plataforma e provoque uma impressão malsucedida. A seguir à primeira solidificação, a plataforma de construção move-se verticalmente para que seja espalhada uma nova camada de resina na plataforma e se repita o processo de solidificação pelo feixe de luz. Este procedimento repete-se até que a base dos suportes esteja impressa e tenha a altura indicada pelo computador da impressora.

Seguidamente inicia-se o processo de impressão da peça, imprimindo camada a camada um padrão novo resultando na peça e nos seus suportes. Estes suportes são necessários porque a impressão ocorre no sentido oposto à força da gravidade. Os suportes permitem segurar a resina curada. Estes suportes são considerados resíduos, não sendo utilizados na peça final e sendo retirados após a lavagem através da lixa ou de maquinação.

É na impressão que ocorrem os problemas relacionados com o projeto, problemas que geralmente ocorrem no *slicer* e que requerem atenção.

4.3.1.1 Identificação de Problemas da Impressão

Apesar da fase de impressão ser facilitada pelo *PreForm*, existem problemas que só são resolvidos através da experiência e da realização de vários testes. Estes problemas são os seguintes.

4.3.1.1.1 Escolha da resina desapropriada.

A utilização da resina deve ocorrer conforme a utilidade e a facilidade de impressão. A finalidade da resina é o fator mais importante na escolha da resina, visto que cada resina tem propriedades diferentes. Certas resinas aguentam forças de tensão mais elevadas que outras, e outras resinas suportam extensões extremas.

4.3.1.1.2 Utilização inadequada de suportes.

A utilização insuficiente de suportes pode provocar uma má impressão, visto que a força gravítica imposta no objeto e o movimento vertical imposto no objeto podem fazer com que este não esteja corretamente ligado à plataforma de construção. O excesso de suportes no objeto pode tornar as faces do objeto rugosas ou fazer com que a impressão não alcance as tolerâncias pretendidas. O tipo de base dos suportes também permite, ou não, a aderência dos suportes à plataforma de construção. Uma má decisão da base dá azo a uma má impressão ou a um desperdício de material. E a altura da peça à base provoca uma redução de material utilizado ou um aumento do material utilizado. A altura é condicionada ao objeto utilizado e ao tipo de base utilizada.

4.3.1.1.3 Orientação errada da peça.

A orientação da peça é fulcral. Dela dependem todas as alterações necessárias bem como a utilização de mais material, de mais tempo de impressão ou até uma má impressão. O estudo da orientação do ângulo entre os eixos x e y da impressão e dos ângulos com x e z, y e z faz com que a peça se oriente mais na vertical ou na horizontal, utilizando menos ou mais suportes.

4.3.1.1.4 *Layout* incorreto da peça;

O *layout* da peça na plataforma de impressão é um problema identificado, visto que a proximidade da peça ao lado do laser resulta numa impressão mais rápida, mas a proximidade desta ao *mixer* provoca uma impressão mais perfeita. Para além disso, a colocação sobre a linha de impressão pode provocar defeitos na impressão.

4.3.2 Processo de Fabrico

O fabrico de peças feitas através da impressão 3D ocorre através da impressão, mas após esta existem duas fases importantes que requerem atenção, a lavagem e a cura.

4.3.2.1 Identificação de problemas da Lavagem

A limpeza do objeto ocorre de forma manual, híbrida ou automatizada. Todas estas formas de limpeza necessitam da utilização de um solvente, que pode ser Álcool isopropílico (IPA) ou Éter monometílico de dipropileno glicol (ou TPM) que requer água após a sua lavagem. Estes solventes são espalhados na peça e na plataforma de impressão e lavam os mesmos.

A necessidade de lavar as peças com estes tipos de solvente prende-se com a resina que se encontra agarrada à plataforma de impressão e à peça. Esta resina tem que ser retirada pois prejudica a impressão e é prejudicial à saúde. Uma lavagem incorreta permite que as peças não tenham uma superfície limpa, que a peça tenha resina presa e que se notem as imperfeições. As oportunidades de melhoria relacionadas com a lavagem são as seguintes:

4.3.2.1.1 Diferença entre utilizar IPA ou TPM com água.

Os dois solventes utilizáveis conduzem a diferentes resultados de limpeza. Estes solventes diferem em vários parâmetros, desde custos a segurança.

4.3.2.1.2 Tipo de lavagem.

A lavagem pode ocorrer manualmente, em formato híbrido (feito inicialmente manualmente e a seguir através da máquina de lavar) ou só através da máquina de lavar. Estes tipos de lavagem requerem condições para a sua utilização e o estudo destas condições faz com que se melhore a utilização das lavagens.

4.3.2.1.3 Limpeza do solvente.

O solvente perde as suas propriedades a partir do momento em que é despejado no tanque da máquina de lavar. Devido à evaporação do solvente, que ocorre continuamente quando o volume envolvente não é selado e o tanque não é fechado, este fenómeno provoca uma diminuição do volume do solvente, que com a utilização, é contaminado pela resina.

4.3.2.1 Identificação de problemas da Cura

A cura é a fase final deste processo de MA. Ocorre obrigatoriamente após a lavagem do objeto. Este processo ocorre através da emissão de luzes UV e de temperatura no objeto impresso durante algum tempo, já predefinido. Este tempo de cura está relacionado com o tipo de resina utilizada.

Nesta fase de cura a peça ganha mais rigidez e alcança as propriedades de tensão e de elasticidade da de acordo com a resina utilizada. Mas, antes da peça alcançar estas

propriedades pode ou não necessitar da utilização de suportes. As seguintes oportunidades de melhoria são relacionadas com a cura.

4.3.2.1.1 Utilização do pré-aquecimento para diferentes tipos de geometrias.

A utilização de suportes durante a cura é algo que pode ser dispensado, dependentemente da estrutura e do peso da peça. O tipo de resina e volume do objeto impresso pode requerer o pré-aquecimento para garantir a estrutura desta.

4.3.2.1.2 *Layout* de cura.

As peças têm de ter a maioria das faces expostas à luz UV para que a cura seja o mais eficaz possível. Assim sendo, o posicionamento da peça depende da sua forma. O *layout* das peças no prato giratório deve ser realizado de acordo com a quantidade de peças para curar, e o formato das mesmas.

4.3.3 Organização e Formação

4.3.3.1 *Layout* da MA

As máquinas que permitem fazer impressão 3D encontram-se na sala de reuniões do GEP. Estas máquinas emitem gases tóxicos devido à utilização do álcool e da resina, pelo que há a necessidade de ventilar o local.

Inicialmente inseriu-se uma ventoinha de pequenas dimensões e um sistema de ar-condicionado no local, de forma a ventilar o local. No entanto, este continuava a apresentar um ambiente tóxico e muito inflamável. Para além disso, numa sala que é de reuniões, a utilização das máquinas de impressão 3D só pode ocorrer quando não existe nenhuma reunião na sala. Além disso, as reuniões também não podem ocorrer logo após o processo, uma vez que o ambiente é tóxico.

Para além do problema da partilha de local e da pouca ventilação da sala, existe ainda o problema de pós-cura. Há a necessidade de se lixar, furar ou lavar a peça para que esta esteja consoante o pretendido e com a melhor superfície. Este problema agrava-se visto que as máquinas de furação e de lixar se encontram na ponta oposta à área da MA, ou seja, segundo a figura 4.11, no lado direito da Oficina do GEP.

Considerando a filosofia *Lean*, como a área da MA não se encontra muito próxima da área onde ocorrem os seus pós-processos, existe desperdício de tempo. Este problema assume uma maior importância visto que a empresa de estudo segue a filosofia *Lean* e por isso é tão premente encontrar soluções para este problema.

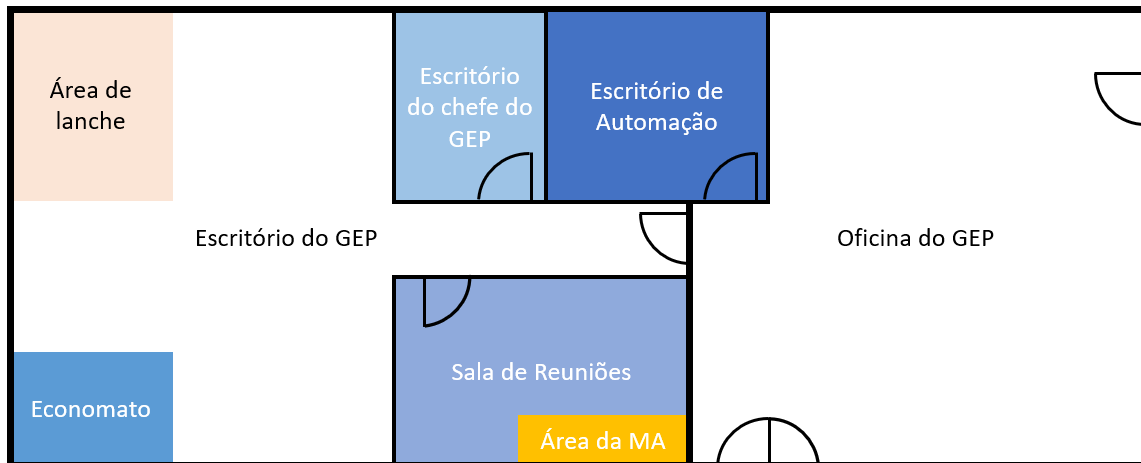


Figura 4.11 - *Layout* do GEP

4.3.3.2 Organização e Instrução dos funcionários

Visto que um dos problemas de integração da impressão 3D na empresa é a organização e instrução/elucidação dos funcionários sobre a MA, cedo se colocou a necessidade de uma rápida reorganização desta área, permitindo a sua melhor utilização.

Foram identificados os seguintes problemas:

- Ausência de documentação de instrução sobre a utilização da MA;
- Ausência de documentação de manutenção da MA;
- Falta de organização de desenhos CAD;
- Falta de organização de desenhos STL;
- Falta de gestão da MA;
- Verificação insuficiente da filosofia *Design for Additive Manufacturing*;

Estes problemas requerem protocolos e ficheiros que permitam melhorar o funcionamento e a utilização da impressão 3D. Os problemas identificados nas secções 4.3.1 e 4.3.2 também permitem o melhoramento da MA e são integrados nestes protocolos.

Um dos problemas identificados que permite instruir os funcionários está relacionado com a manutenção corretiva de uma pistola ionizadora e é um problema adequado para resolver e demonstrar aos funcionários.

4.3.4 Linha de montagem de motores

Na linha de montagem de motores ocorre um problema. Após colocar a cola em dois pontos do motor é necessário colocar uma bola de 4mm em cada um destes pontos. Como os funcionários utilizam luvas, e a destreza para segurar uma só bola com um diâmetro tão pequeno é insuficiente, confrontam-se com o seguinte problema: ao colocar uma bola nos pontos específicos do motor soltam-se três a quatro bolas, resultando num desperdício de bolas de 4mm. Para além do desperdício provocado, também o local (de trabalho) acumula sujidade, já que as bolas se vão encontrando soltas pelo chão.

Este caso permite estudar a interação da impressão 3D na empresa uma vez que não é possível maquinar um conjunto de peças que faça o que se pretende neste caso.

Sendo assim, a peça que se pretende imprimir tem de cumprir seguintes requisitos:

- Dispõe bolas de 4mm;
- Tenha um depósito de bolas;
- Seja de fácil manutenção;
- Suporte quedas e seja seguro para uso humano;
- Permita melhoramentos.

4.4 Análise e triagem dos problemas

Após o reconhecimento de problemas e de possíveis oportunidades de melhoria nas várias áreas relacionadas com a Manufatura Aditiva, foram analisadas as de maior relevância e de maior impacto nos processos de projeto e de fabrico, visto que a organização, a formação bem como o problema identificado na linha de montagem de motores careciam de uma solução imediata e têm um impacto enorme. A possível solução para os problemas apresentados passa pela eliminação de desperdícios como o material defeituoso, o sobre processamento e a inutilização adequada dos recursos humanos.

Para os problemas identificados no Projeto utilizou-se uma análise, assente em *brainstorming*, com o objetivo de examinar a necessidade de resolver estes problemas e o impacto que a resolução destes poderá ter. Através desta análise determinou-se que:

- O problema da escolha de resina é um problema que tem uma reduzida necessidade de resolução e uma baixa velocidade de resposta, apesar de ter um impacto elevado nas futuras escolhas de resina de acordo com o pretendido;

- O problema relacionado com a posição adequada de suportes requer uma análise de dois aspetos: a quantidade/densidade de suportes e a espessura dos mesmos. Este problema é importante, mas a velocidade de resposta está dependente do problema de orientação da peça;
- A orientação da peça é o problema que requer mais trabalho, pois conforme a geometria da peça, a orientação deve ser alterada, logo todas as outras características também devem ser alteradas (suportes e *layout*). A orientação requer uma elevada velocidade de solução e tem uma enorme importância, constituindo-se como a característica de projeto que tem mais dependentes.
- O *layout* da peça promove a velocidade de impressão e a qualidade, uma vez que quando se decide melhorar a qualidade, a qualidade de impressão diminui e assim vice-versa. Esta oportunidade de melhoria, apesar de vantajosa em algumas peças, devido à velocidade de resposta que promete, é uma oportunidade que não tem elevada importância. No entanto, foi estudada, visto que pode facilitar a capacidade e velocidade de resposta dos operacionais em caso de problemas de manutenção, entre outros.

Os problemas apontados no Fabrico apresentam dois fatores importantes no processo de impressão 3D: a Lavagem das peças requer uma análise da segurança, da economia e da sustentabilidade, bem como uma investigação sobre o resultado do tipo de lavagem na peça. O estudo das oportunidades de melhoria na Cura das peças permite instruir os operadores sobre as melhores formas de utilização desta fase final do processo. Desta forma, para a Lavagem fez-se a seguinte análise:

- O problema de encontrar solventes para além do IPA e diferenciá-los permite procurar novas oportunidades de melhoria contínua e descobrir soluções possivelmente mais económicas ou mais seguras. Esta oportunidade, apesar de muito importante, visto que está em causa a segurança humana, não tem necessidade de resolução, apesar de ter sido estudada para constar como informação da empresa;
- Os tipos de lavagem requerem um desenvolvimento de estudo, devido uma vez que as peças impressas podem apresentar geometrias variadas que requerem lavagens diferentes. Para além disto, o tipo de solvente e a concentração deste também requer atenção. Estes pontos são de elevada importância de estudo e carecem de uma elevada e rápida necessidade de resolução;

- A concentração de resina no solvente é um fator preocupante na eficiência na limpeza da resina não curada da peça. A concentração de resina geralmente causa problemas na limpeza, como por exemplo, a demora na limpeza e/ou limpezas mal realizadas. Sendo um problema dispendioso, e conseqüentemente, importante, requer uma solução rápida e eficaz, ou seja, existe necessidade de solução.

Para a Cura das peças também se fez uma análise e a triagem dos pontos a melhorar, a saber:

- A utilização do pré-aquecimento da curadora é necessária para algumas geometrias e ocasiões incomuns. O pré-aquecimento é uma oportunidade de melhoria, que deve passar pela instrução dos funcionários. Logo constitui-se como importante, apesar de não ter grande necessidade de ser resolvida imediatamente;
- O *layout* da cura das peças é um problema recorrente. Uma vez que havia falta de experiência e de formação adequada, a forma como posicionavam as peças resultava numa indevida cura de algumas peças. Logo, é um problema que se deve ter em consideração. Todavia, ocorre sobretudo quando se procede à cura de grandes quantidades de peças em simultâneo.

Relativamente há pistola inonizadora, a manutenção corretiva desta máquina permite instruir os funcionários. Esta proposta é importante e é uma ótima oportunidade de instruir os funcionários sobre as funcionalidades que a Impressão 3D permite, apesar de esta melhoria não ter sido abordada neste estudo visto que engloba outras empresas para além da que é abordada no estudo de caso.

4.5 Propostas de melhoria

Os problemas que foram identificados na secção 4.3 encontram-se implementados nesta secção. Desde a impressão ao *layout* foram encontrados problemas que tornam o processo pouco funcional e produtivo. Destaca-se a necessidade de o tornar exequível e mais prático para os funcionários. As soluções ou possíveis soluções encontram-se presentes nesta secção.

4.5.1 Melhorias no Projeto

Os problemas relacionados com o projeto requereram diferentes tipos de abordagem. Em algumas foram realizados testes funcionais, enquanto outras passaram por uma análise computacional.

4.5.1.1 Melhorias na impressão

4.5.1.1.1 Escolha da resina

Na Eugster/Frismag existem 3 tipos de resina. Estas resinas têm diferentes tipos de utilidade, embora duas destas tenham fins semelhantes. As resinas são:

- Resina **Grey Pro**;

A resina Grey Pro é uma resina utilizada para protótipos, visto que tem um acabamento superficial superior à Tough 1500. Tem uma resistência e uma rigidez semelhante ao polímero ABS (Acrilonitrila butadieno estireno ou, em inglês, *Acrylonitrile butadiene styrene*) e ao polímero PC (Policarbonato ou, em inglês, *Polycarbonate*). Estes polímeros são utilizados na empresa como moldes para a linha de montagem de peças, aguentam tensões muito elevadas e são geralmente estacionários. Além do mais, esta resina tem uma extensão pequena, sendo de 13% após a cura.

O seu acabamento superficial, superior à Tough 1500, requer pouca ou nenhuma maquinação no pós impressão, visto que as camadas de espessura são de 0,05mm e de 0,1mm. Na figura 4.12 apresenta-se uma peça impressa em Grey Pro, que apresenta os detalhes que esta resina permite imprimir.



Figura 4.12 - Peça Impressa em Grey Pro

(formlabs, 2022)

Na tabela 4.2 encontra-se uma comparação entre as propriedades mecânicas do ABS e do PC com a Grey Pro, encontrando se as propriedades da Grey Pro pós impressão e pós-cura.

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas da resina Grey Pro e os materiais equivalentes.

	Material			
	Grey Pro		ABS	PC
	Pós Impressão	Pós Cura		
Tensão de Cedência à Tração	33 MPa	61 MPa	24 a 138 MPa	55 - 75 MPa
Tensão de Young	1,4 GPa	2,6 GPa	±2,2 GPa	2,0 a 2,4 GPa
Elongação até estricção	33%	13%	10 a 12%	80 a 150%
Tensão de Cedência à Flexão	39 MPa	86 MPa	77 Mpa	82 MPa
Módulo à Flexão	0,9 GPa	2,2 GPa	2,5 GPa	2,3 GPa
Resistência ao Impacto IZOD	Sem dados	18,7 J/m	203 J/m	640 a 930 J/m

Comparando os materiais utilizados com a resina Grey Pro, nota-se que a resina tem tensões próximas ou dentro do intervalo de tensões dos materiais utilizados, mas na elongação e na resistência ao impacto IZOD, a resina não se comporta de forma igual ou muito próxima aos materiais utilizados. Desta forma é preferível utilizar a MA em vez de maquinação para peças complexas.

- **Resina Tough 1500;**

A resina Tough 1500 é uma resina resiliente, também utilizada para protótipos como a Grey Pro, mas sem a qualidade superficial e a velocidade de impressão que a Grey Pro oferece. É uma resina com características semelhantes ao LDPE (Polietileno de baixa densidade ou Low-Density Polyethylene, em inglês), HDPE (Polietileno de alta densidade ou High-Density Polyethylene, em inglês) e ao PP (Polipropileno ou Polypropylene, em inglês), que são plásticos com tensões elevadas, mas com bastante elasticidade. O PP encontra-se presente na fábrica em peças utilizadas pelas funcionárias. É um material que tem uma elevada resistência ao impacto e que não se quebra ao cair das bancadas. No entanto, é um material que requer maquinação para chegar ao estado final de peça, demorando a ser fabricado, e que não permite fabricar peças muito complexas.

A Tough 1500 tem sido utilizada quando o PP não é viável, nomeadamente em situações em que as peças são complexas ou quando se trata de peças repetidas. A Tough 1500 permite imprimir peças que podem estar em contacto com a pele humana e peças com grande tensão, durabilidade e elasticidade. A figura 4.13 representa uma impressão feita através de Tough 1500. Nesta impressão as duas molas têm no seu espaçamento interior um veio que orienta as molas e uma peça que consegue pressionar as molas. Quando ocorre esta pressão, as molas não quebram e comportam-se elasticamente, provocando resistência ao movimento.



Figura 4.13 - Peça impressa pela Tough 1500

(formlabs, 2022)

A impressão de peças com esta resina pode ocorrer em camadas de 0,1 mm ou de 0,05 mm, o que permite uma impressão pormenorizada e dentro das tolerâncias pretendidas. Não obstante disso, no pó impressão é necessária maquinaria para retirar suportes ou as marcas destes. Na tabela 4.3 encontra-se uma comparação entre as propriedades da resina Tough 1500 e os polímeros abordados anteriormente.

Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas da resina Tough 1500 e os polímeros equivalentes.

	Material				
	Tough 1500		LDPE	HDPE	PP
	Pós Impressão	Pós Cura			
Tensão de Cedência à Tração	26 MPa	33 MPa	10,3 a 18 MPa	7,6 a 43 MPa	31 a 45 MPa
Tensão de Young	0,94 GPa	1,5 GPa	0,3 GPa	0,9 a 1,55 GPa	1,95 GPa
Elongação até estirção	69%	51%	200 a 750%	9 a 18 %	10 a 12 %
Tensão de Cedência à Flexão	15 MPa	39 MPa	Sem dados	13,8 a 75,8 MPa	1,5 GPa
Módulo à Flexão	0,44 GPa	1,4 GPa	0,152 a 2,21 GPa	0,97 a 1,38 GPa	1,35 a 1,8 GPa
Resistência ao Impacto IZOD	72 J/m	67 J/m	475 J/m	71 a 159 J/m	35 a 60 J/m

- Resina **Flexible 80A**;

A Resina Flexible 80A é uma "resina que permite produzir peças que se podem dobrar ou comprimir" (Emetrês, 2022) , mas com tal resistência que tem uma reação de mola demorada comparada com outra resina elástica, Elastic 50A. Na figura 4.14 encontra-se, do lado esquerdo, a Flexible 80A e, do lado direito, a Elastic 50A. Neste teste ambas as peças foram carregadas com uma força durante breves instantes e libertadas desta força para observar a velocidade de reação de cada peça. A Elastic 50A teve uma reação superior à Flexible 80A (como se pode observar na figura).



Figura 4.14 - Comparação da Flexible 80A com a Elastic 50A

(formlabs, 2022)

A Flexible 80A é uma resina que tem características semelhantes ao TPU (Poliuretano termoplástico ou Thermoplastic Polyurethane, em inglês). É também semelhante ao silicone e à borracha natural, relacionando-se com estes materiais devido à sua durabilidade e força de rasgo. Esta resina é, das três existentes na empresa, a menos utilizada, e a que demonstra mais dificuldades a imprimir. A sua elasticidade faz com que as suas peças necessitem de perfis simples, uma vez que o movimento vertical faz com que a resina não assente na camada impressa anteriormente, desviando-se da posição original e resultando numa má impressão.

Na tabela 4.4 encontra-se uma comparação entre a resina e os materiais a que esta se assemelha.

Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas da Flexible 80A e os polímeros equivalentes.

	Material				
	Flexible 80A		TPU	Silicone	Borracha Natural
	Pós Impressão	Pós Cura			
Tensão de Cedência à Tração	3,7 MPa	8,9 MPa	28 a 96 MPa	29 a 96 MPa	3,45 a 24,13 Mpa
Tensão a 50% de elongação	1,5 MPa	3,1 MPa	7,69 MPa	Sem dados	Sem dados
Elongação até à fratura	100%	120%	10 a 86%	5 a 1490%	300 a 900%
Resistência ao rasgo	11 kN/m	24 kN/m	43,8 kN/m	0,877 a 125 kN/m	Sem dados
Dureza	70 A	80 A	55 a 83 A	1 a 95 A	30 a 95 A
Resiliência da costa	Sem dados	28%	Sem Dados	25 a 65%	80%

Estas resinas abordadas são as que se encontram presentes no caso de estudo. Todas apresentam características e propriedades mecânicas e químicas diferentes. Na figura seguinte (figura 4.15) encontra-se uma comparação entre as resinas. De acordo com a figura, conclui-se que a Grey Pro é a que melhor suporta tensões à tração e à flexão, mas comparada com a Tough 1500 não suporta impactos e extensões como esta. Todavia a Flexible 80A é a resina que melhor suporta extensões.

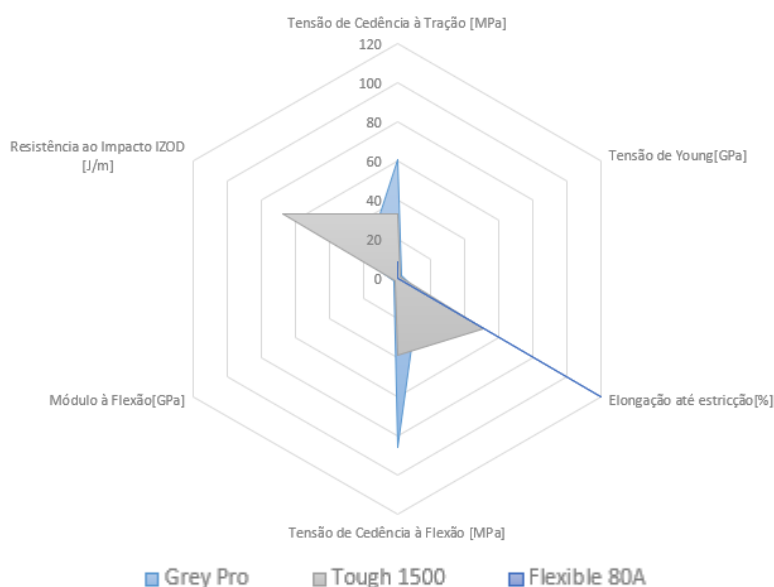
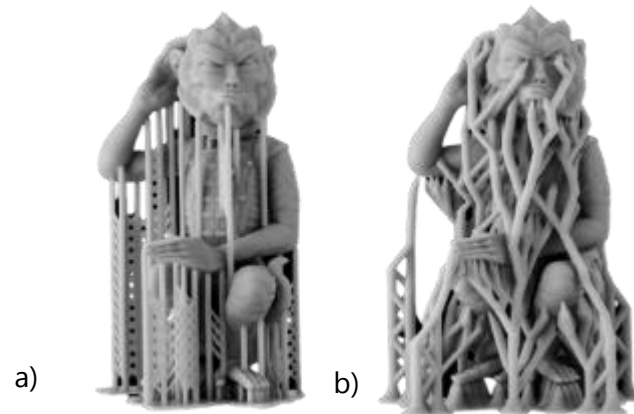


Figura 4.15 - Comparação entre as resinas utilizadas

No Anexo A apresenta-se uma tabela de decisão de resina. Esta tabela apresenta os materiais que a resina equivale permitindo assim o operador a escolher a resina que mais se adequa ao seu trabalho.

4.5.1.1.2 Utilização dos suportes

A utilização dos suportes é indispensável quando se imprime através da SLA, mas é algo que pode ser descartável para certas formas de peças. O objetivo, ao melhorar a utilização de suportes, é permitir uma utilização mais limpa e económica, ou que suporte mais tensões, pois o uso excessivo de suportes provoca erros superficiais, como o que é apresentado na figura 4.17, ou erros nas formas da peça, como apresentado na figura 4.16.



a) Peça com a utilização incorreta de suportes; b) Peça com a utilização correta dos suportes

Figura 4.16 - Erros superficiais causados pelo uso incorreto dos suportes

(Portela, 2020)



Figura 4.17 - Erro funcional causado pela falta de suportes

Estes erros podem fazer com que a peça impressa não desempenhe as funções pretendidas. De forma a resolver estes problemas definiram-se normas que foram definidas para as forças que a peça sofre, o custo da utilização dos suportes e a funcionalidade da peça. As normas são:

- Utilizar suportes quando as paredes têm uma espessura inferior a 0,2 mm;
- Não utilizar suportes em superfícies importantes da peça;
- Não utilizar suportes em furos;
- Utilizar suportes em pontes;
- Usar suportes em saliências acima de 5 mm;
- Utilizar suportes em peças em que as faces sejam todas paralelas é desnecessário;
- A densidade dos pontos de contacto e dos suportes pode-se compreender entre o 0,6 e 0,7;
- O tamanho do ponto de contacto dos suportes deve ser compreendido entre 0,5mm e 1mm de espessura;
- O ponto de fixação dos suportes não deve ser concentrado em certos pontos, mas sim distribuído e aleatório, não havendo nenhum padrão. A posição destes pontos geralmente, é estudada várias vezes até chegar a um estado bom para impressão. Existem várias formas de fazer com que estes pontos sejam postos de forma a imprimir corretamente.

Na figura 4.18 encontra-se um objeto exemplo que permite demonstrar os seguintes parâmetros: os objetos têm 45830 mm^3 , a peça encontra-se a 45° com os eixos X-Y e X-Z, as faces funcionais são os interiores, ou seja, nas áreas menores dos quadrados.

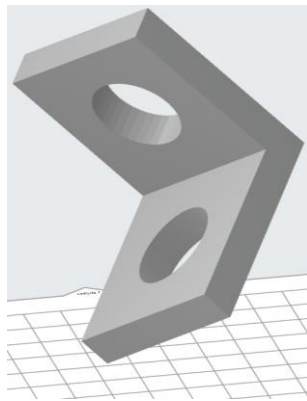
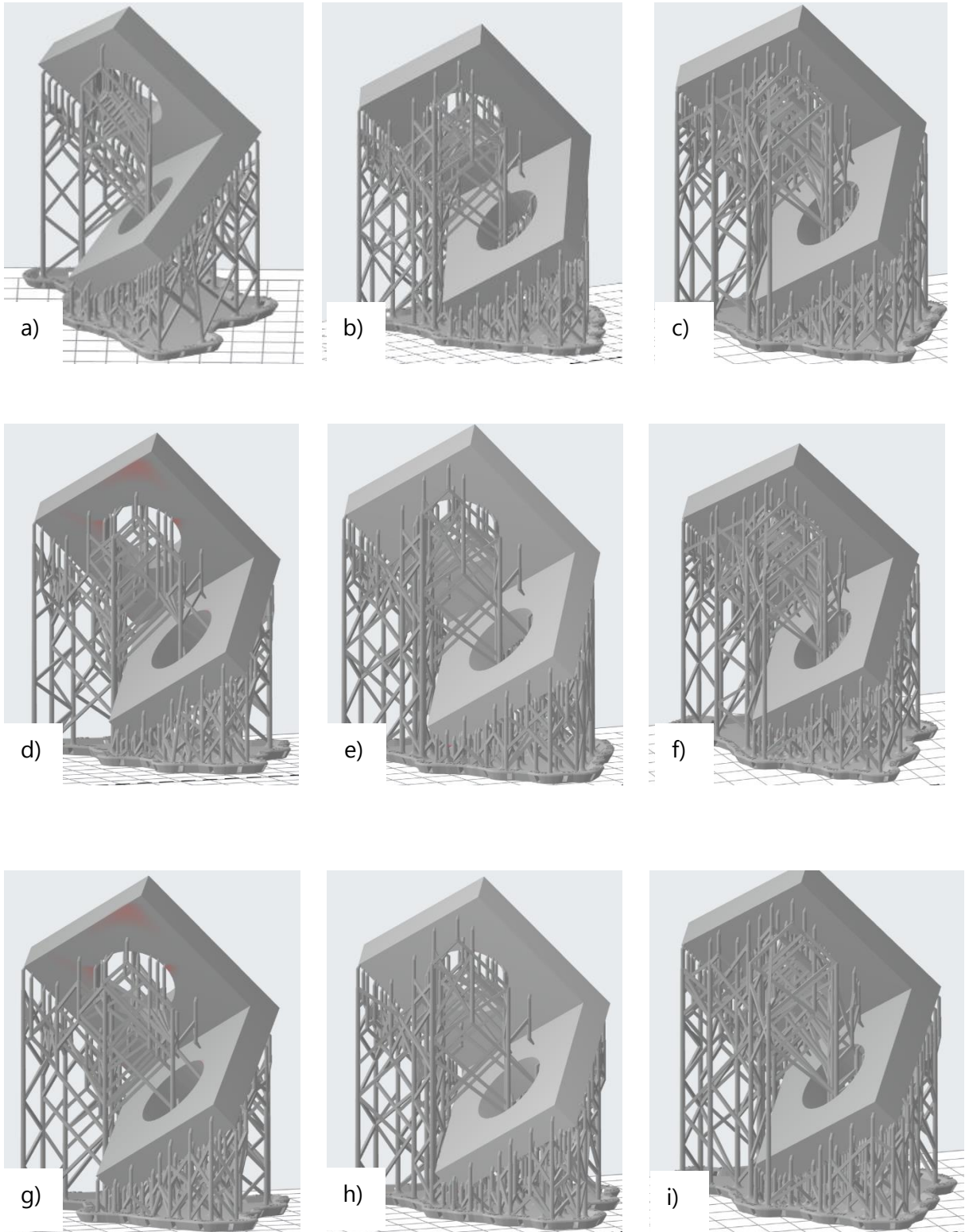


Figura 4.18 - Objeto exemplo

Também se encontra na tabela 4.5 a informação sobre a densidade de suportes utilizados, o tamanho do ponto de fixação do suporte, a qualidade de impressão, a percentagem de resina desperdiçada comparada com a peça impressa sem suportes e a nomeação do objeto.



a) Objeto A; b) Objeto B; c) Objeto C; d) Objeto D; e) Objeto E; f) Objeto F; g) Objeto G; h) Objeto H; i) Objeto I;

Figura 4.19 - Teste de suportes

Comparando os dados obtidos através do *PreForm* e inseridos na tabela 4.5, observa-se que para o objeto B, ou seja, a figura 4.19b), o tamanho de suportes indicados é 1,0 mm e a densidade de suportes é 0.75. Estes dados permitem fazer uma impressão de excelente qualidade utilizando pouco material para suportes, a saber 20,99mL de resina.

Tabela 4.5 - Comparação entre vários tipos de suportes

Densidade de suportes	Espessura do ponto de fixação	Figura	Qualidade	% de material desperdiçado	Nome do Objeto
0,5	1,0 mm	4.19	Boa	31,5	Objeto A
0,75	1,0 mm	4.20	Muito boa	45,8	Objeto B
1	1,0 mm	4.21	Boa	57,3	Objeto C
0,5	0,75 mm	4.22	Má	37,9	Objeto D
0,75	0,75 mm	4.23	Boa	45,4	Objeto E
1	0,75 mm	4.24	Boa	56,7	Objeto F
0,5	0,5 mm	4.25	Má	38,5	Objeto G
0,75	0,5 mm	4.26	Boa	45,4	Objeto H
1	0,5 mm	4.27	Boa	55,9	Objeto I

A diminuição da altura da peça à base dos suportes resulta na diminuição da quantidade de resina utilizada, embora se trate de uma diminuição de cerca 1 mL. Para os dados obtidos anteriormente a altura é de 5,0mm, mas ao utilizar uma altura de 3,0mm, a resina utilizada reduz para 0,3mL.

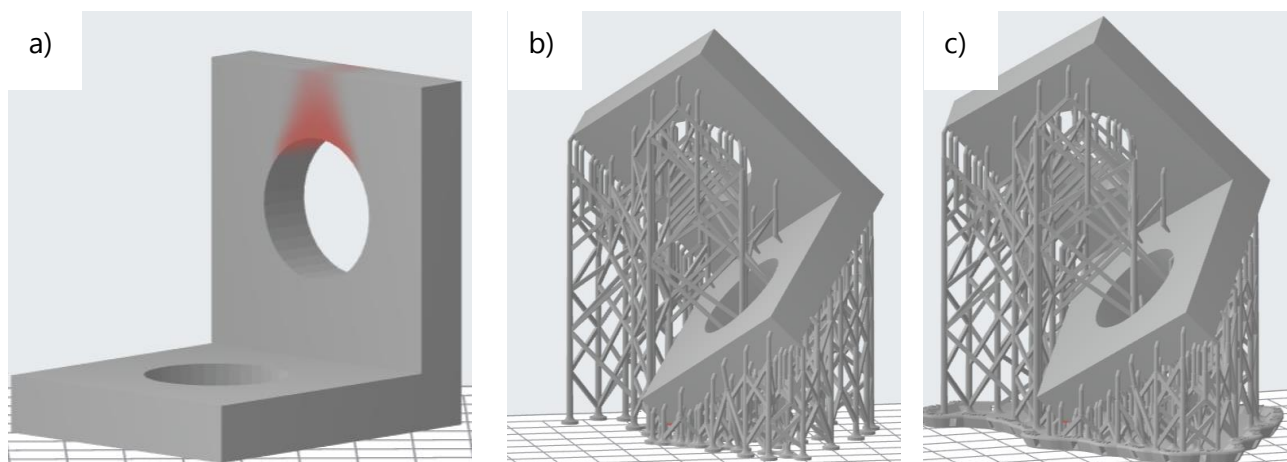
Outra forma de reduzir a quantidade de resina é diminuindo a altura mínima da base dos suportes ao ponto mínimo do objeto. No entanto, é de salientar uma desvantagem, uma vez que, ao diminuir a altura, os suportes poderão não estar estáveis e a peça poderá movimentar-se durante a impressão, resultando numa impressão não precisa.

As bases dos suportes também são configuradas conforme o tipo de objeto impresso e a resina utilizada. Na impressão pode decidir-se se não existe jangada de suportes (*none*), se existem jangadas individuais dos suportes (*mini rafts*), ou se existe uma jangada comum para todos os suportes (*full rafts*). Caso se faça uma impressão sem jangada de suportes, aumenta-se a compressão segundo o eixo z e a camada de impressão inicial. O aumento destes é linear, ao aumentar a compressão para uma unidade tem de se duplicar a camada de impressão (p.e. se a compressão for 0,5, então a camada tem que ser 1mm). Este estilo é geralmente utilizado em peças com uma base completamente plana, moldes e para formas com 3 ou mais faces perpendiculares exteriores. Este aumento ocorre para que a peça impressa não se deforme segundo o eixo z, porque as primeiras camadas de impressão permitem que a peça adira à base de impressão. Estas camadas são comprimidas para aderirem completamente à base, não tendo a espessura de camada inicialmente escolhida. A escolha entre *mini rafts* e *full rafts*

ocorre conforme o volume da peça. Caso a peça tenha um volume inferior a 400mm^3 , utilizam-se as *mini rafts*, em todos os outros casos utilizam-se as *full rafts*. As *full rafts* são as jangadas, que estão definidas por predefinição, e permitem produzir todas as peças. Infelizmente são também as que desperdiçam mais material. Para a peça exemplo, apresentada na figura 4.18, utilizaram-se os três tipos de jangada, de forma a proceder à sua análise. Esta análise, que avalia a capacidade de impressão das peças, o volume de resina utilizado para as jangadas e o tipo de jangada utilizada, encontra-se na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Comparação entre as diferentes jangadas

Tipo de Jangada	Capacidade de Impressão	Figura	Volume de material desperdiçado [mL]
None	Incerta	4.20 a)	1,0
Mini Raft com altura de 3 mm	Incerta	4.20 b)	13,6
Full Raft com altura de 3 mm	Positivo	4.20 c)	20,7



a) Peça exemplo sem jangada; b) Peça exemplo com jangadas individuais e 3mm de altura; c) Peça exemplo com jangada comum e 3mm de altura

Figura 4.20 - Teste de *rafts*

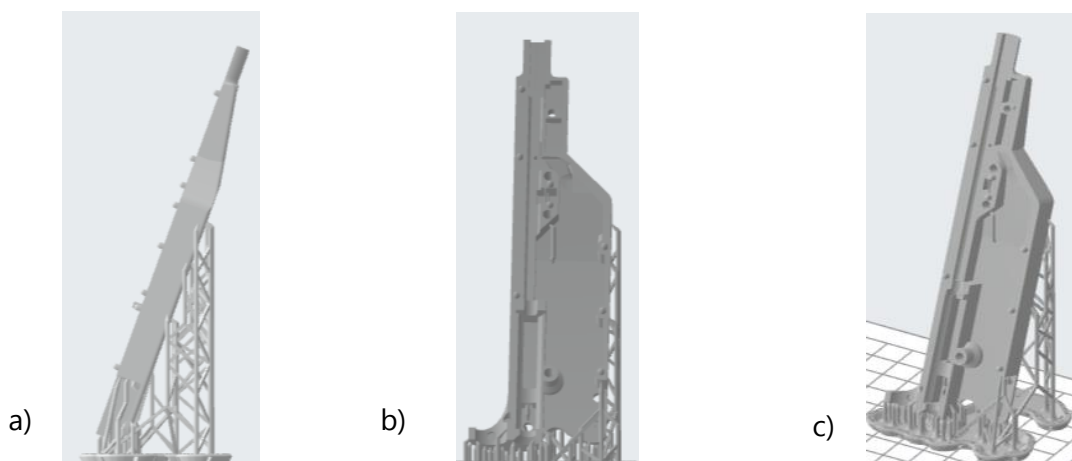
A partir dos dados obtidos na tabela 4.6, observa-se que a utilização de *Full Rafts* faz com que o volume desperdiçado nas jangadas seja superior aos outros tipos de jangadas, mas proporciona uma impressão garantida. A utilização das *Mini Rafts* conduz a um menor desperdício de material, mas como esta peça é superior aos 300mm^3 , não é possível imprimir desta forma. Nesta peça é possível não utilizar jangada, mas, a impressão é incerta devido à

existência de pontos onde é necessário a utilização de suportes, caso esta impressão resulte defeituosa, faz-se uma nova com as definições de jangada abordadas anteriormente.

4.5.1.1.3 Orientação do objeto impresso

O consumo de mais ou menos resina, a utilização de mais ou menos suportes bem como a perfeita impressão da peça dependem da orientação da mesma relativamente aos eixos de impressão x, y e z.

A orientação da peça é uma condicionante na utilização dos suportes, visto que pode requerer mais ou menos suportes. A orientação das peças obedece a um fator importante, o peso. Quando uma peça tem uma parte mais pesada, esta parte deve encontrar-se mais próxima à base de impressão, como é apresentado na figura 4.21. Nestas figuras a zona inferior é a zona mais pesada, onde se encontra mais massa de resina para solidificar e para tal é necessário que, quando se orienta a peça, esta zona se encontre mais próxima da base de impressão.



a) Vista lateral dum dispensador de bolas; b) Vista frontal dum dispensador de bolas; c) Vista ortogonal dum dispensador de bolas

Figura 4.21 - Vistas do dispensador

Outro fator a ter em conta na orientação é a face funcional da peça. No exemplo apresentado acima, a face funcional encontra-se orientada no sentido contrário à base de impressão. Esta orientação é obrigatória porque as faces que se encontram viradas no sentido da plataforma de construção têm suportes e provocam uma superfície irregular, após a impressão. Para que a face funcional seja impressa da melhor forma possível é preciso que esta seja impressa no sentido inverso à plataforma.

De forma a orientar a peça na melhor forma possível, utilizam-se ângulos de 40° a 60° entre os eixos x e z e ângulos de 45° entre os eixos x e y. Para analisar melhor os ângulos de

impressão fez-se um teste com um objeto impresso orientado a dois ângulos, 0° e a 45° com o eixo x e z. A figura 4.22 apresenta esse teste.

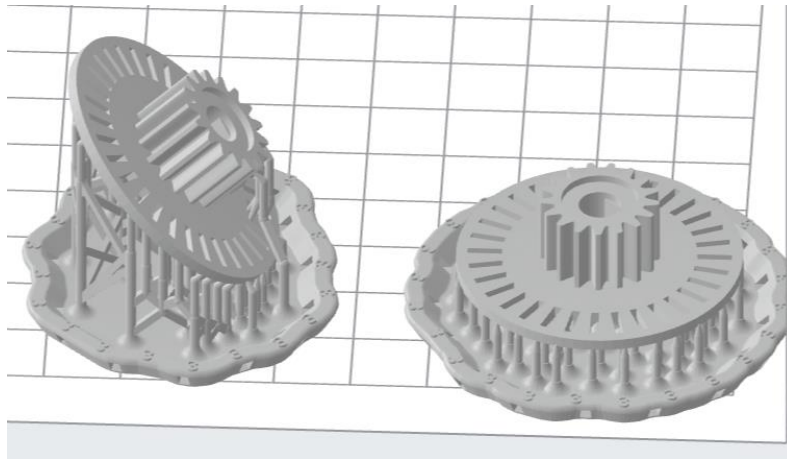
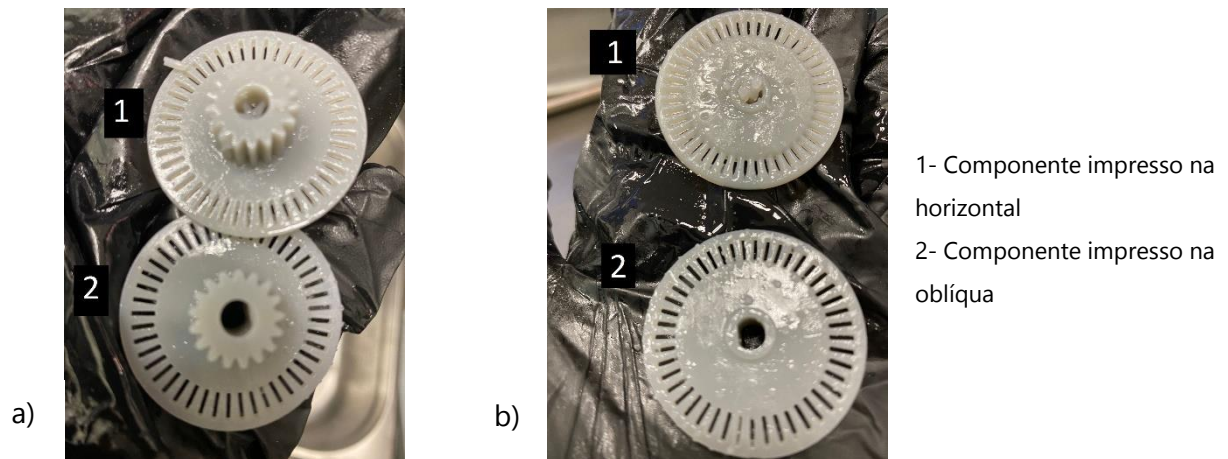


Figura 4.22 - Teste de ângulos de impressão no PreForm

Estas peças apresentadas na figura 4.22 pertencem a um dispensador de fios. Estas possuem furos que permitem ao dispensador cortar os fios com precisão. A impressão destes objetos resultou na figura 4.23.



a) Topo dos componentes do dispensador de fios; b) Base dos componentes do dispensador de fios

Figura 4.23 - Teste de ângulos de impressão

O componente 1 foi impresso na horizontal e o componente 2 foi impresso a 45° com a horizontal e, como se pode observar, existem diferenças nas peças. O componente 1 necessitou de maquinação após a impressão enquanto o componente 2 só precisou de uma lixa. A orientação de peças no intervalo de ângulos de 40° a 60° com a horizontal permite fabricar peças com a melhor qualidade superficial e com o menor desperdício de material em suportes.

4.5.1.1.4 Posição da peça na plataforma de construção

Quando se imprime pretende-se que a peça tenha a melhor qualidade de impressão, mas também que demore o menor tempo possível a imprimir. O posicionamento da peça permite fazer com que a impressão ocorra melhor e que seja o mais rápida possível.

A linha do laser presente na plataforma de impressão é a linha onde os dois lasers se encontram. Nesta linha os lasers passam à vez durante a impressão. Esta passagem sequencial resulta numa impressão com defeitos superficiais e que não suportem as forças pretendidas. Na figura 4.24 encontra-se a plataforma de impressão no programa PreForm.

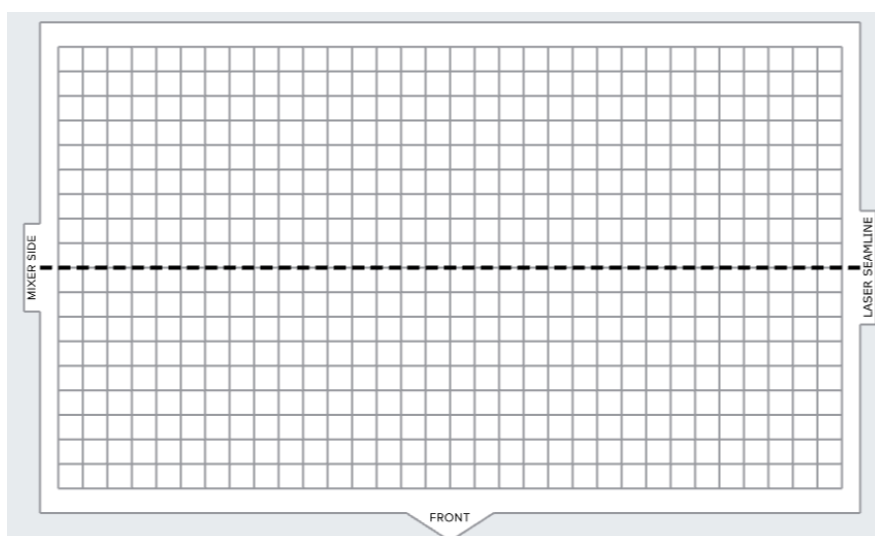


Figura 4.24 - Plataforma de impressão

De forma que não ocorram estes defeitos não se devem imprimir peças sobre a linha que se encontra a tracejado. Para que a impressão tenha a melhor qualidade de impressão colocam-se as peças mais próximas do lado do *mixer*. Deve colocar-se as peças neste lado, uma vez que o *mixer* espalha melhor a resina nesta zona e faz com que os detritos que existam na resina não sejam curados com a impressão da peça. Para que a peça seja impressa mais rapidamente colocam-se as peças mais próximas do laser, porque o laser percorre menos distância para imprimir as peças.

Quando se imprime mais que uma peça, a distribuição destas tem que obedecer a uma condição, a saber, as peças têm que se manter a uma distância superior a 10 mm. Este distanciamento garante que, no caso de uma impressão malsucedida de uma peça, as outras não ficam mal impressas.

4.5.2 Melhorias no Fabrico

Os problemas relacionados com o fabrico requereram diferentes tipos de abordagem. Em algumas foram realizados através de análises computacionais e de segurança, enquanto outros ocorreram através de ensaios experimentais.

4.5.2.1 Melhoria na Lavagem

A lavagem das peças é um processo que pode ser demoroso quando é feito manualmente, mas que pode ser bastante automático e rápido quando se utiliza máquinas de lavar a solvente. O solvente condiciona a lavagem visto que diferentes solventes resultam numa lavagem mais ou menos tóxica, mais ou menos demorada ou mais ou menos bem-sucedida. Nesta secção abordam-se soluções na escolha de solvente e os vários tipos de lavagens para cenários diferentes.

4.5.2.1.1 Utilização do solvente

A escolha do solvente depende de vários fatores: segurança para o utilizador, qualidade superficial, preço e facilidade de aquisição. Os solventes utilizados para realizar esta análise são o IPA ou o TPM. Na Tabela 5.6 encontra-se a comparação entre IPA e TPM.

Tabela 4.7 - Comparação entre IPA e TPM

Solvente	IPA Álcool Isopropílico	TPM Éter monometílico de dipropileno glicol
Segurança ao utilizador	Muito Volátil Inflamável Tóxico	Pouco Volátil Não inflamável Não Tóxico
Qualidade Superficial	Quando se encontra em contacto com a resina demasiado tempo danifica as superfícies.	Eficaz na remoção da concentração da resina.
Preço	4,35€/L	15,8€/L
Facilidade de Aquisição	Muito fácil de adquirir	Bastante difícil de adquirir
NOTAS		Após as limpezas com TPM utiliza-se água para retirar o TPM. Permite o triplo de lavagens comparado com o IPA antes de se mudar o TPM presente na máquina.

Quando comparamos ambos os solventes conclui-se que:

- O IPA é menos caro que o TPM;
- Dois litros do IPA equivalem a dois litros de mistura de água e TPM (mistura 1 para 1);
- O IPA demora menos tempo a evaporar, comparativamente ao TPM.
- O IPA é mais fácil de adquirir, uma vez que é um solvente bastante usual e comercial;

A facilidade de aquisição do IPA e a diferença de preços entre ambos o solvente permitem-nos concluir que o IPA é, atualmente, a melhor escolha. Não obstante disso, é importante referir que, caso o TPM custasse metade do seu preço atual e fosse facilmente comercializado, este seria a melhor opção uma vez que é mais seguro e que não compromete a qualidade de impressão.

4.5.2.1.2 Tipo de lavagem

O tipo de lavagem depende de três fatores: o tipo de resina utilizada, o tipo de geometria e a concentração de IPA no tanque da máquina de lavar. Quando se lava uma peça manualmente o tempo de lavagem é superior ao lavar uma peça utilizando uma máquina. Um conjunto de peças lavadas numa máquina de lavar pode demorar 10 minutos para o conjunto, enquanto uma lavagem manual demora cerca de 7 minutos por peça. Mas, apesar do tempo que demora lavar as peças manualmente, este tipo de lavagem é necessário para algumas peças. A lavagem manual é utilizada para peças ocas, ou com canais internos, ou com superfícies ocas. Na tabela 4.8 encontram-se formas de limpar as peças com estas propriedades.

Tabela 4.8 - Forma de limpar peças com geometrias específicas

Geometria	Forma de limpar
Peças Ocas	Partes ocas devem ter furos para escoar para que exista uma impressão com sucesso. Durante a lavagem, os furos permitem o solvente entrar e limpar as superfícies internas. Deve-se ter cuidado quando se remove estas partes do cesto de lavagem e garantir que a peça liberta todo o solvente para o cesto antes de transferir para outro sítio.
Canais Internos	Canais estreitos podem não escoar inteiramente, então utiliza-se uma seringa com solvente para limpar.
Superfícies concavas, impressas e limpas na plataforma de construção	Algumas partes impressas diretamente na plataforma de construção podem prender resina e solvente dentro durante o ciclo de lavagem. Ao retirar as peças da plataforma e lavá-las no cesto ou lavá-las uma segunda vez é uma das formas de retirar a resina. Outra forma é lavá-las manualmente.
Peça longas	Existem partes que se movem com a circulação do solvente no cesto de lavagem podem ficar retidos na tampa interior da máquina. De forma a que não bloqueie a tampa interior quando o ciclo de lavagem acaba e o cesto se eleva, deve-se verificar o tamanho da peça antes de inserir.

Para as resinas presentes no estudo de caso deve-se limpar as peças com os tempos demonstrados na tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Tempo de lavagem de cada resina

Resina	Tempo de Lavagem	Notas
Grey Pro	15 minutos	Deve-se lavar 15 minutos e alterar-se o tempo de lavagem conforme a geometria e a pureza do solvente.
Tough 1500	10 minutos	Peças submetidas a condições ambientais e em contacto com a pele ou peças com geometrias complexas (p.e.: paredes finas ou áreas que permitem o IPA se prender) requerem uma secagem duradora antes da cura.
Flexivle 80A	10 minutos	

Para além do tipo de resina e do formato das peças, quando a concentração de álcool é muito baixa, cerca de 85%, deve-se aumentar 5 minutos no tempo de lavagem. A concentração do álcool presente na máquina de lavar vai diminuindo com as lavagens, devido à resina que é retirada das peças. Para além disso, a concentração também diminui devido à evaporação do álcool.

4.5.2.1.3 Limpeza do solvente

A recuperação do solvente permite a reutilização do IPA e, portanto, a diminuição dos custos do consumível, que é utilizado em quantidades superiores a 20L, cada vez que se enche a máquina de lavar. A mudança do solvente presente na máquina dá-se quando a concentração da resina presente neste chega aos 20%, ou seja, quando a máquina de lavar faz cerca de 5 horas acumuladas de lavagem.

A recuperação do solvente é um processo moroso, mas permite recuperar pelo menos um ciclo de vida deste álcool, ou seja, em vez de este ser desperdiçado devido há contaminação, utilizam-se seis passos para retirar a maioria dos resíduos presentes no solvente. Este processo inicia-se utilizando uma bomba que retira o álcool contaminado do tanque e o insere num reservatório com o nome de "1ª Fase" (bidão à esquerda na figura 4.25). Este álcool é repousado durante dois dias, para que as partículas de resina de várias dimensões possam repousar no fundo do bidão. Este primeiro processo requer que o reservatório "1ª Fase" se encontre o mais estático possível e que, após o transporte do álcool, o reservatório seja fechado para que não se dê a evaporação do solvente.



Figura 4.25 - Reservatórios de álcool

Depois desta primeira fase de repouso de dois dias, transfere-se o álcool do reservatório "1ª Fase", utilizando uma bomba. O transporte do álcool faz-se de acordo com o que está ilustrado na figura 4.26, isto é, a bomba elétrica deve ter a cabeça que suga submergida a 5 mm do topo do álcool para que a sucção seja só álcool. Quando a boca da bomba se encontra próxima do bidão, pára-se de mover o álcool, visto que este álcool requer processos de limpeza que não são possíveis de se fazer através deste método. Este álcool, sugado pela bomba, termina num funil com um filtro de café que se encontra repousado num outro bidão, designado por "2ª Fase" (bidão do meio na figura 4.26). O funil encontra-se na figura 4.27 e é constituído por quatro pontos de encaixe. Estes pontos de encaixe são utilizados noutra fase com outro funil mais detalhado. Nesta segunda fase, o álcool já se encontra menos turvo. A opacidade, é uma das formas de verificação, sem utilização de sensores, se o solvente continua contaminado.

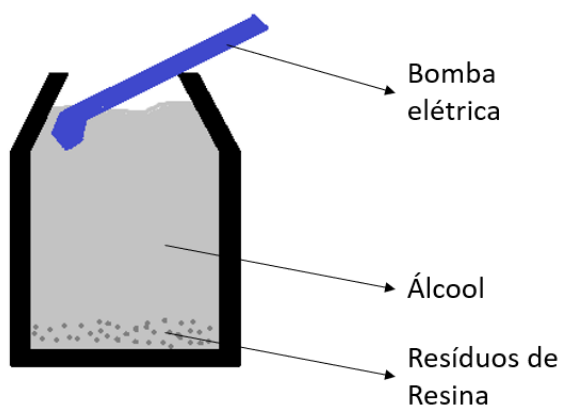


Figura 4.26 - Processo de transporte de álcool



Figura 4.27 - Conjunto funil

Após terminar de ser cheio com álcool, o reservatório "2ª Fase" é colocado à janela, onde tem de estar em contacto com a luz solar. O reservatório tem que estar obrigatoriamente à janela e não no exterior, visto que, no exterior o reservatório pode fazer efeito de estufa no

seu interior e assim evaporar o álcool que se encontra no seu interior. Este processo é o mais moroso. Requer que o reservatório esteja ao sol durante quatro dias ou mais, até se notar a diferença no álcool: geralmente o álcool torna-se mais limpo e permite observar, no fundo do reservatório, a resina curada acumulada.

Depois deste período, retira-se o álcool do reservatório "2ª Fase" e coloca-se num recipiente menor. Note-se que para o método apresentado na figura 4.26 e para o conjunto do funil completamente montado com um filtro de café (apresentado na figura 4.27). O funil com furos permite à resina depositar em cada furo lentamente, em vez de só ser filtrada no fundo do funil, assim a filtração da resina ocorre continuamente e não num ponto fixo. Esta fase é denominada por quarta fase.

Prossegue-se para a quinta fase deste método. Esta fase requer o recipiente de menores dimensões e a curadora utilizada no processo de Impressão 3D. Para utilizar a curadora criou-se um perfil no sistema informático da curadora, que não aquecesse o seu interior e que tivesse uma hora e meia a emitir luz UV. Na figura 4.28 encontra-se o processo em execução. Esta fase final permite à resina que não foi curada através do sol, ser curada na curadora e, assim, facilitar a sua filtração.



Figura 4.28 - Curadora a emitir luz UV com recipiente

O sexto passo é a última filtração desta resina que foi curada na curadora. Utilizando o processo explicado anteriormente na figura 4.26, e com o funil completamente montado como na figura 4.27, com um filtro de café transporta-se o álcool presente nestes pequenos recipientes para o reservatório de álcool limpo, que se encontra na figura 4.26 à direita.

4.5.2.2 Melhorias na cura

A cura é a fase mais automatizada da impressão 3D. Para realizar a cura de uma peça utilizamos uma (máquina) curadora. Esta máquina permite-nos escolher o tempo para curar as resinas.

A curadora é constituída por um disco giratório e vários lasers que permitem curar as peças. É ainda revestida por paredes refletoras dos raios UV que permitem curar as peças em todas as direções.

4.5.2.2.1 Pré-aquecimento para várias geometrias

A cura das peças é um processo que ocorre através do *preset* definido pela resina utilizada, mas conforme a geometria das peças, a resina utilizada e a dimensão das peças é necessário aplicar algumas práticas. Na tabela 4.10 apresentam-se soluções para certas geometrias.

Tabela 4.10 - Soluções para cura correta de geometrias específicas

Geometria Específicas	Solução da cura
Uso Excessivo de Suportes	Os suportes são utilizados em certas peças porque estas podem não ter constituição que as permita estar suportadas sem suportes. A utilização dos suportes pode bloquear a luz e fazer com que esta não chegue às superfícies da peça. Remover os suportes resolve este problema, mas não se pode remover inteiramente os suportes porque pode causar problemas estruturais à peça.
Peças longas ou grandes	Enquanto que existem peças que cabem na mesa giratória sem suportes, também existem peças grandes ou longas que requerem um arranjo especial para permanecerem verticalmente sem suportes. Deve considerar-se a dimensão das partes quando se desenha os suportes da estrutura ou se planeia a cura.
Peças grossas	Estas requerem um longo tempo ou uma temperatura mais elevada durante a cura, uma vez que demoram mais tempo a aquecer. Quando se curam peças com este tipo de geometria, deve aquecer-se a peça antes de a curar, adicionando o preheat à cura para que a peça aqueça antes da cura.
Geometrias finas	A deformação durante a cura ocorre geralmente nas peças finas, com suporte insuficiente ou expostas a pouca luz UV. A FORM Cure L ajuda a prever as deformações ao rodar a peça durante o ciclo da cura e ao expor luz na peça em todas as direções, incluindo por baixo da mesa giratória. O uso de suportes faz com que a deformação destas peças não ocorra frequentemente. Para que estes suportes ocorram de forma eficaz têm que ser definidos no PreForm antes da impressão da peça.

Na pré-cura, sugere-se utilizar 10 minutos de pré-cura a 60°C, com o propósito da peça estar sujeita a temperaturas próximas da cura e para que as geometrias referidas anteriormente sejam curadas equitativamente.

4.5.2.2.2 *Layout* no disco giratório

Para que a cura ocorra da melhor forma possível tem-se de dispor as peças de forma que todas estas curem uniformemente e curem a maioria das faces. A curadora é constituída por um prato giratório com 39cm de diâmetro, para que todas as peças sejam radiadas pelo raio UV deve-se dispor as mesmas uniformemente radialmente como é apresentado na figura 4.29 para o caso de quatro peças. A distância do centro do disco ao centro da peça deve ser entre 5cm e os 10cm. Na figura 4.30 encontra-se um conjunto de 5 peças que foram curadas na curadora.

Nota: As peças não necessitam que as faces funcionais estejam viradas no sentido dos lasers UV visto que a luz é refletida em todas as direções pelas paredes.

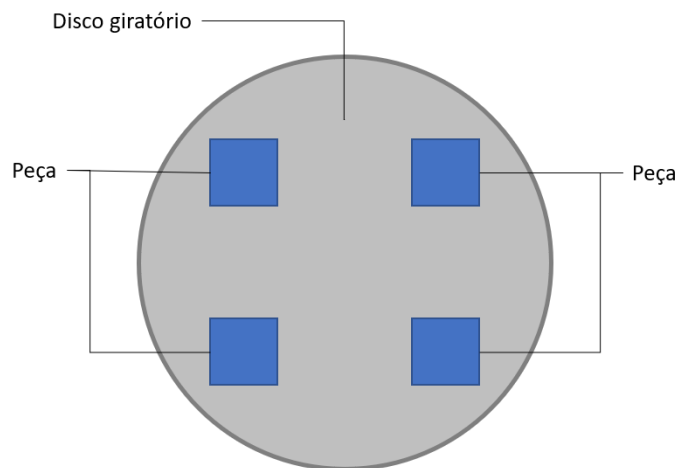


Figura 4.29 - Ilustração de como dispor as peças na curadora



Figura 4.30 - Cura de 5 peças distribuídas radialmente

4.5.3 Melhorias na Organização e Formação

4.5.3.1 Organização no *layout* da área de Impressão 3D

Na empresa em causa a área de MA encontrava-se dentro da sala de reuniões condicionando a sua utilização, uma vez que a sala se destinava, sobretudo, a outros propósitos. Sempre que se utilizava a MA para impressão e lavagem, o ambiente da sala tornava-se muito tóxico, devido aos vapores libertados pela resina e pelo IPA e houve, portanto, a necessidade de se proceder a alterações no que diz respeito à distribuição do espaço. Procedeu-se à criação de uma sala própria para a MA, de forma que esta possa ser utilizada sem grandes restrições e sem causar problemas de saúde a quem utiliza a sala de reuniões.

Na figura 4.31 encontra-se a nova planta do GEP.

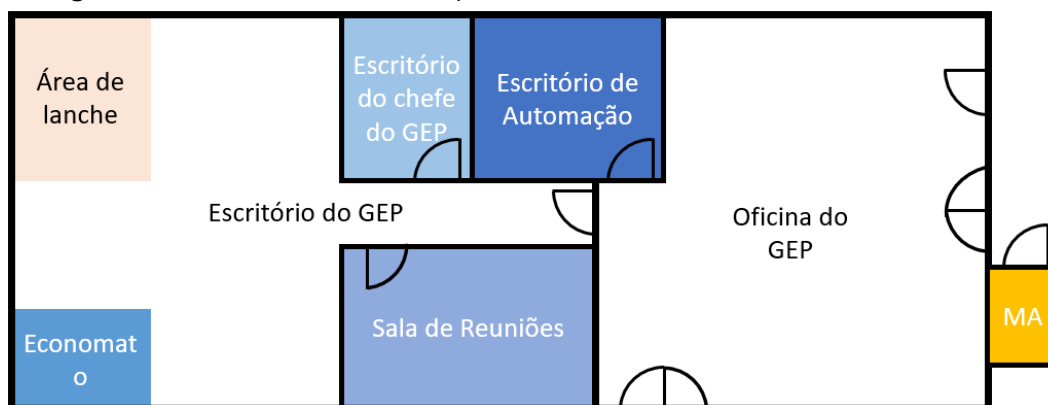


Figura 4.31 - Novo *layout* do GEP



Figura 4.32 - Fotografia da curadora e da máquina de lavar na nova área da MA



Figura 4.33 - Fotografia da impressora na nova área da MA

Após estas máquinas terem sido movidas para a nova área, identificaram-se as ferramentas e as máquinas com uns adesivos que permitem demonstrar ao funcionário, que utiliza esta área, que as máquinas e ferramentas identificadas estão limpas de resina. Desta forma, o funcionário pode utilizá-las sem ter que colocar uma luva e, caso suje este utensílio tem que o limpar, visto que tem que estar obrigatoriamente limpo. Na figura 4.34 encontra-se a impressora identificada por adesivos em pontos específicos que permitem mostrar que esse ponto da impressora se encontra limpo.

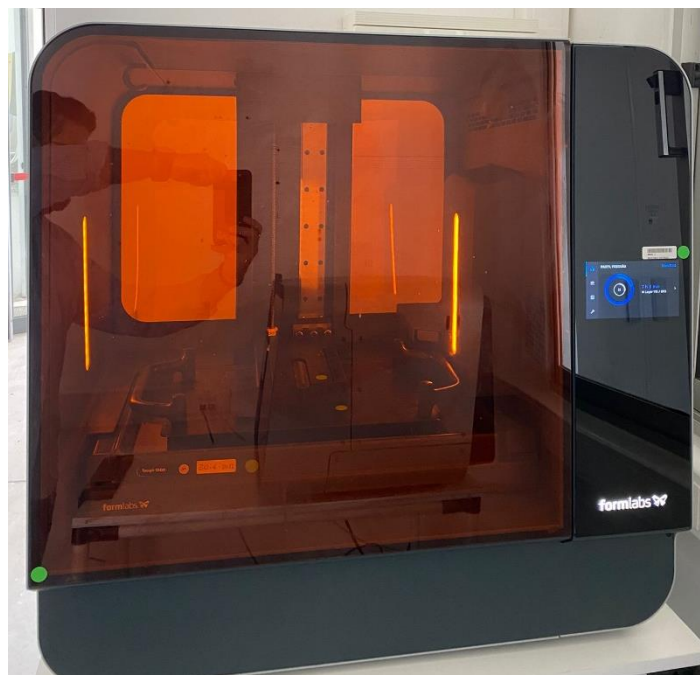


Figura 4.34 - Impressora identificada por adesivos verdes que indicam as zonas limpas

4.5.3.2 Formação e organização dos funcionários

A formação e organização dos funcionários relativamente à MA era reduzida. Para instruir e organizar a MA criou-se um manual de impressão, e propôs-se uma pasta de desenhos, um ficheiro de gerenciamento da MA e aplicou-se a impressão 3D num caso prático na empresa.

4.5.3.2.1 Instrução dos funcionários

Para formar introduziu-se um manual de impressão, em que este inclui: o processo de impressão 3D, ou seja, a impressão, a limpeza, a cura e o processo pós-cura; boas práticas relativamente à impressão, à lavagem e à cura; a manutenção de cada máquina utilizada na impressão e possíveis problemas do sistema da impressora; e descarte dos resíduos.

Neste manual incluiu-se o que foi estudado na subsecção 5.1. O resultado destes estudos permitiu aos funcionários conseguir analisar melhor as decisões tomadas anteriormente, e aplicar o que é abordado no manual nas novas impressões. Para além da informação que resultou no Manual de boas práticas, decorreu uma pequena formação sobre impressão 3D proporcionada pela empresa EMETRÊS. Todo processo da MA é abordado no manual, e encontra-se representado algumas páginas no Anexo B. O processo de fabrico aditivo através da impressão 3D, que se encontra apresentado na figura 4.35, inicia-se com o desenho da peça, tendo em consideração uma das seguintes três condições: a existência da peça em formato digital, em formato CAD ou stl; a existência da peça em formato físico, que permita ser desenhada através das várias formas de desenho; idealização de uma peça inexistente e tenha que ser desenhada.

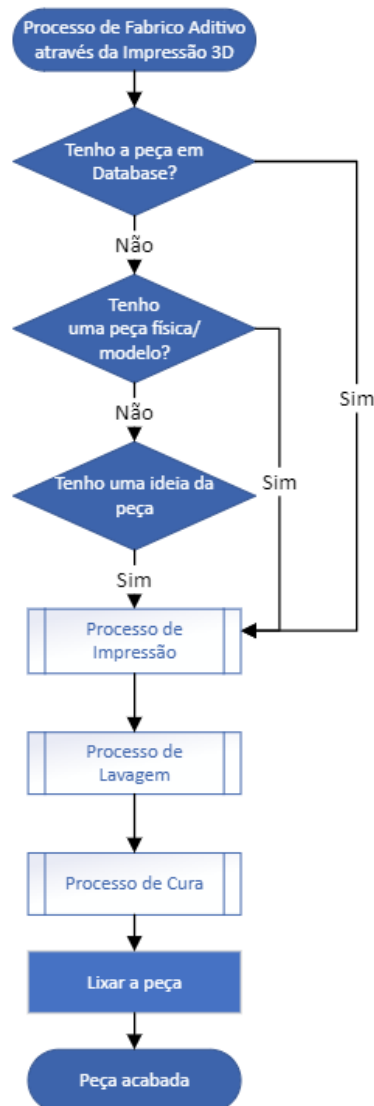


Figura 4.35 - Processo de fabrico aditivo através da impressão 3D

Após o processo inicial, figura 4.36, de ir de uma peça desenha-se a mesma; este desenho é reproduzido em formato CAD; prossegue-se com a conversão deste para o formato stl. Esta conversão ocorre através do programa em que se desenha. Contudo, é sempre recomendável guardar os dois ficheiros, o ficheiro CAD e o stl. A seguir liga-se a aplicação PreForm e importa-se o ficheiro stl do desenho que se pretende imprimir. Antes de imprimir, figura 4.37, é necessário verificar vários aspetos: o tipo de resina a utilizar, a espessura da resina impressa, a orientação da peça ao ser impressa, as estruturas que a suportam e o *layout* da plataforma de impressão. Após a verificação destes pontos, devem ser verificados os aspetos relacionados com a máquina: a presença da plataforma de construção e os cartuchos de resina. Finalmente, após verificar todos estes pontos coloca-se a impressora a imprimir.



Figura 4.36 - Processo de impressão

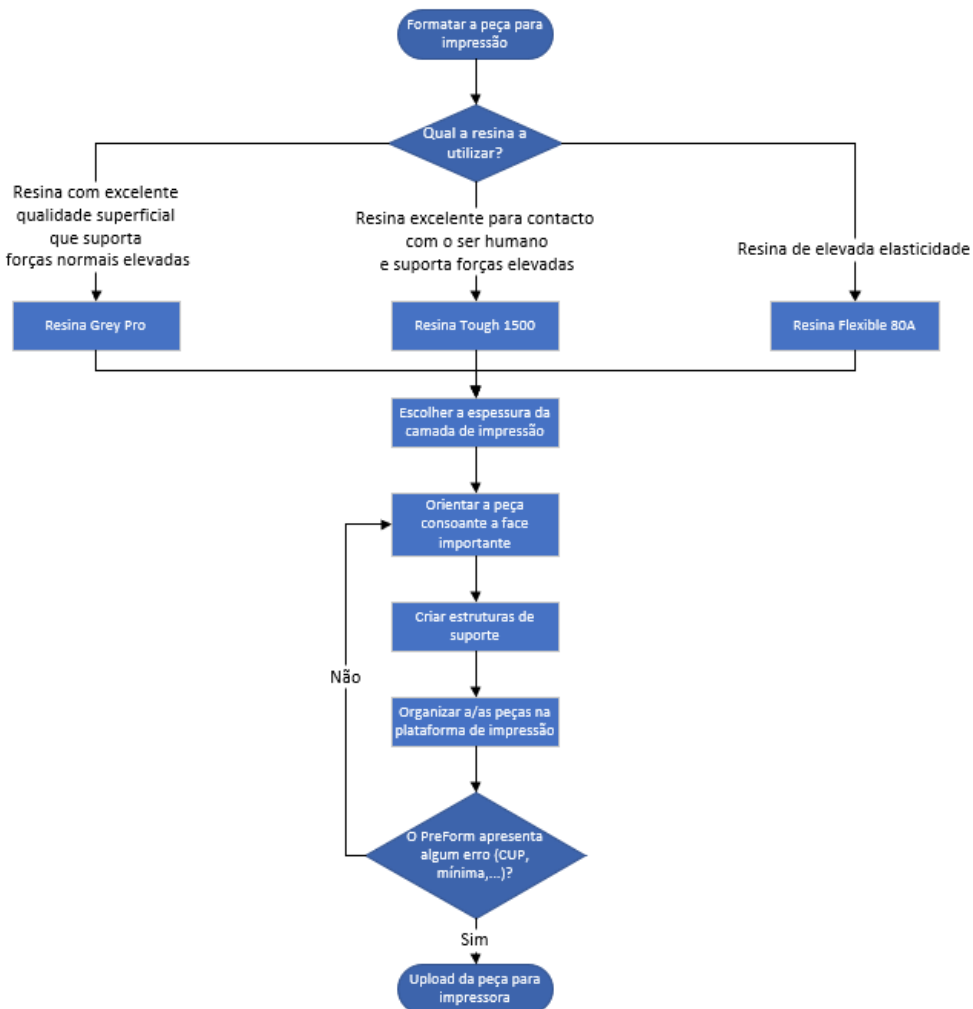


Figura 4.37 - Subprocesso de impressão

Após a conclusão da impressão obtém-se a peça impressa no seu estado primordial. Agora é necessário lavá-la, retirando-lhe todos os resíduos de resina deixados durante a sua impressão. Para tal, deve seguir-se o seguinte processo, figura 4.38: socorrendo-se de utensílios específicos para o efeito, retira-se a peça da plataforma e decide-se sobre a necessidade de a lavar através de um processo que conjuga a lavagem manual com a lavagem automática, ou proceder apenas à lavagem automática, figura 4.39. Nesta decisão deve ter-se em consideração a quantidade de peças impressas e as características das mesmas, como por exemplo, a presença de superfícies ocas, concavas ou canais internos. Na necessidade de conjugar os dois tipos de lavagem, primeiro aplica-se a lavagem manual e só depois a lavagem pela máquina. Para proceder à lavagem pela máquina deve considerar-se o tipo de resina com que a peça foi

impresa, a concentração da resina presente no solvente dentro da máquina, álcool isopropílico, e as características da peça impressa já abordadas anteriormente. A lavagem curta é de 5 minutos, enquanto a normal é de 10 e a longa é de 20 minutos. A solução para problemas como estes encontra-se na subsecção 5.1.2.2.

Após a lavagem, seca-se a peça utilizando ar comprimido. Esta secagem é a mais eficiente pois permite ao álcool isopropílico e à resina escoarem mais rapidamente uma vez que o ar pressiona as paredes e empurra estes resíduos.

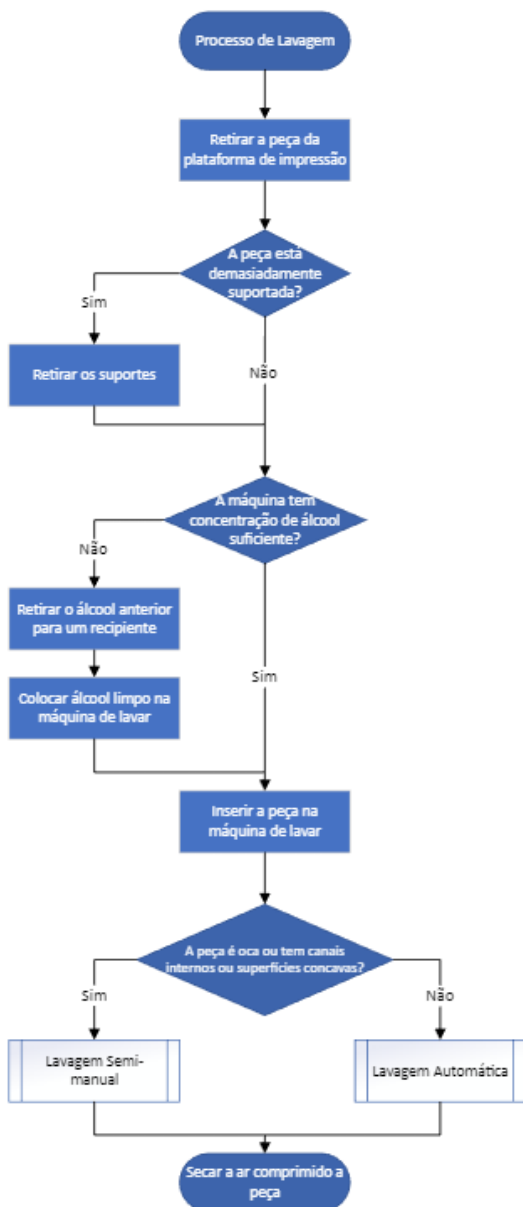


Figura 4.38 - Processo de lavagem

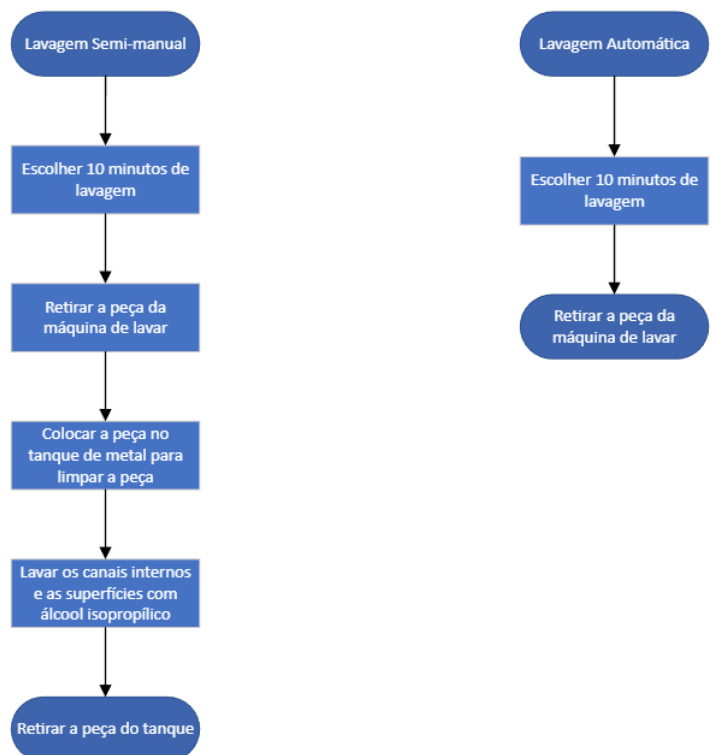


Figura 4.39 - Subprocesso de lavagem

Depois da lavagem ocorre a cura. A cura é facilitada pela curadora utilizada, pois já tem tempos e temperaturas predefinidas de acordo com cada resina utilizada na impressão. Após se escolher a resina utilizada na impressão, tem que se ter em consideração a peça, a utilização excessiva de suportes, ou o facto de a peça ser muito longa, grossa ou ter paredes muito finas leva a que esta tenha de ser pré-aquecida. De seguida, procede-se ao processo de cura. Este processo encontra-se na figura 4.40.

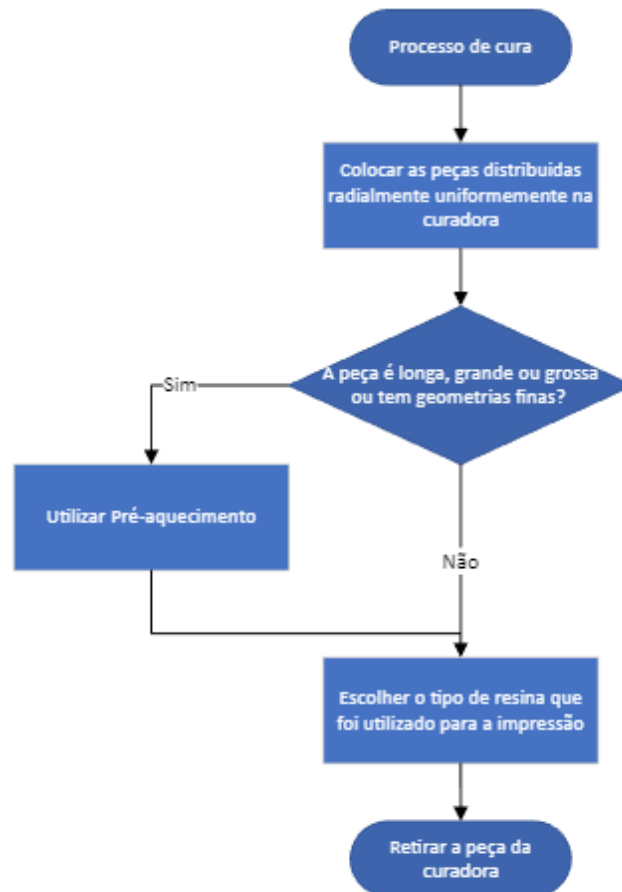


Figura 4.40 - Processo de cura

Após a conclusão da cura, lixam-se as paredes para que se tornem lisas e não apresentem irregularidades e, se não se tiraram os suportes no processo de limpeza, tiram-se após o processo de cura, quando as paredes são lixadas.

No Manual de boas práticas são abordados pontos relacionados com o *Design for Additive Manufacturing* (DfAM). O DfAM cria diretrizes para o desenho a três dimensões. Estas diretrizes são simples e permitem a utilização eficaz da MA. Sugestões sobre o ambiente onde a peça é aplicada ou a divisão da peça em várias, quando se pretende imprimir peças de grandes dimensões, facilitam o trabalho da impressão e os outros processos tanto na pré como no pós impressão.

4.5.3.2.2 Pasta de Desenhos

Os desenhos de qualidade são um ponto fulcral na impressão 3D. Sem a sua existência e a sua organização todo o processo não é possível. Para organizar os desenhos deve criar-se uma pasta digital de desenhos 3D. Desta pasta devem constar três pastas diferentes, a saber, uma relacionada com os ficheiros CAD, outra relacionada com os ficheiros stl e uma outra relacionada com os ficheiros do PreForm.

Esta pasta deverá estar disponível para todos os funcionários do GEP e para todos os gabinetes, incluindo a gabinetes da sede na Suíça. A facilidade na partilha de desenhos permite uma impressão mais rápida de peças protótipos ou de peças funcionais, de forma organizada sem risco de perda do ficheiro durante o processo de comunicação.

Esta proposta de solução está a ser implementada, mas devido a alguns problemas informáticos encontra-se momentaneamente interrompida.

4.5.3.2.3 Ficheiro gerenciamento da MA

Para uma melhor gestão da impressão 3D criou-se um ficheiro informático em formato Excel. Este ficheiro inclui as impressões feitas até à data, a quantidade de resina utilizada na impressão (sendo esta quantidade a que é referida pelo programa *PreForm*), o tipo de resina utilizado, o custo da impressão (incluindo o preço da resina ao mL, o custo da eletricidade e o custo do álcool isopropílico), o tempo de impressão, o tempo de limpeza, o tempo de cura, o custo do tanque por hora e partindo-se do princípio que tem um desperdício de 68% (custo do tanque por hora, resina desperdiçada, custo do álcool, entre outros) o suposto custo real caso se retirasse este desperdício.

Este ficheiro permitiu analisar várias lavagens, nomeadamente lavagem manual, a manual e automática ou só a automática. A análise permitiu chegar aos resultados apresentados na subsecção 4.4.1.1.2. Para além do já referido anteriormente, permitiu analisar o desperdício real, nomeadamente toda a resina que fica agarrada às paredes da peça impressa, as estruturas de suporte, bem como as jangadas e toda a resina que fica semicurada ocasionalmente.

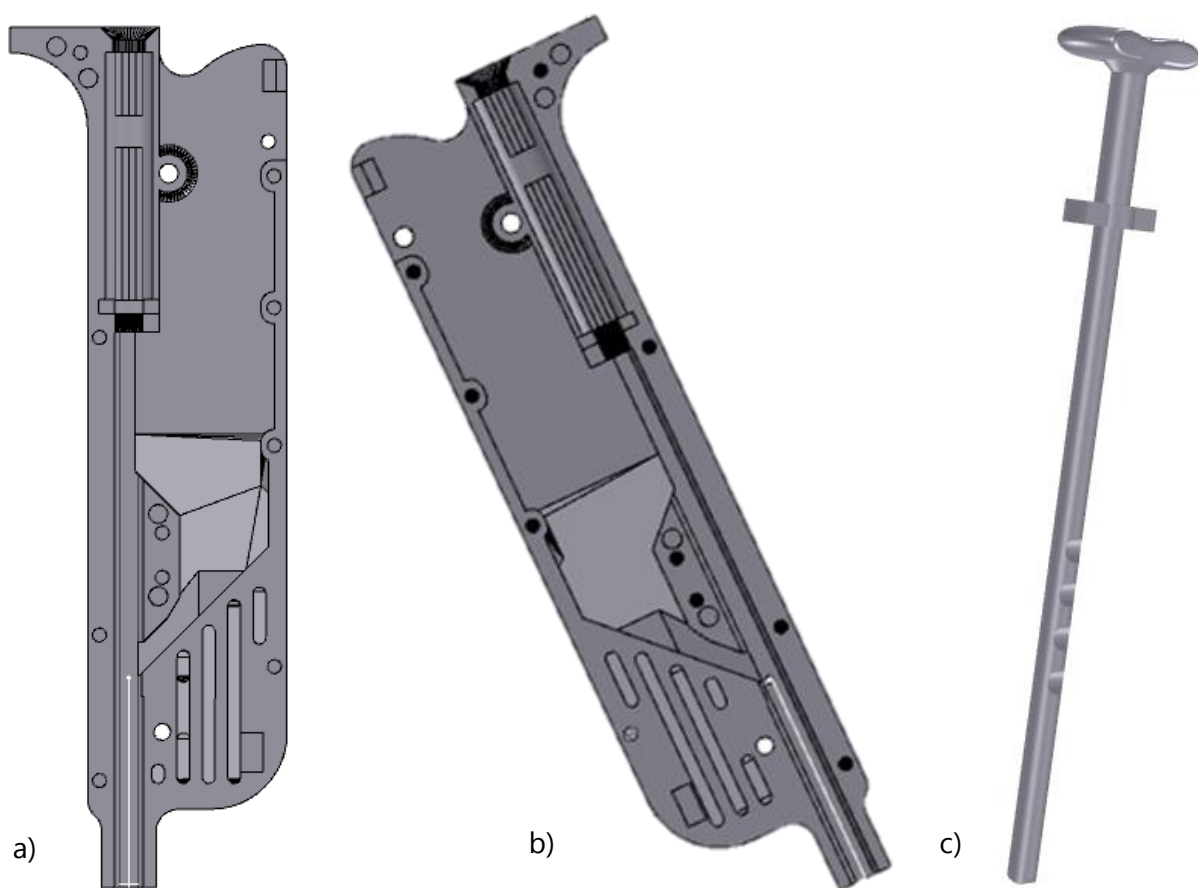
4.5.4 Melhoria na linha de montagem de motores

4.5.4.1 Projeto do dispensador

Para fazer uma peça que tenha um depósito que permita acumular várias bolas, tem que se construir um suporte colado à peça, que não enkrave na entrada das bolas no canal de entrada. A aplicação de uma bola única complica o projeto desta montagem, uma vez que

existe a necessidade de utilizar algo que fixe a bola para que esta não caia. A manutenção fica facilitada se tivermos uma montagem com dois pontos de fixação entre peças. A resina utilizada influencia a resistência da peça a quedas bem como a segurança para o uso humana. A Tough 1500 e cumpre estes requisitos e, para além disso, permite melhoramentos como por exemplo o acrescento de um arnês agarrado à peça que a fixe num sítio de fácil acesso.

Nas figuras 4.41 e 4.42 encontram-se as várias peças que resultam numa montagem projetada em *IronCad*. Esta montagem é constituída por duas cascas, sendo que a casca esquerda que é constituída por dois furos passantes, que no final possuem um espaço para colocar uma porca M4 e um furo no canal para colocar um perno de 3mm, e a casca da direita tem dois furos passantes para a colocação de um parafuso M4 em cada, por um varão que empurra a bola para sair da montagem, e por uma tampa que se situa entre as duas cascas e permite fechar e trancar.



a) Projeto da casca direita do dispensador de bolas; b) Projeto da casca esquerda do dispensador de bolas; c) Projeto do varão de empurrar do dispensador de bolas

Figura 4.41 - Projeto dispensador

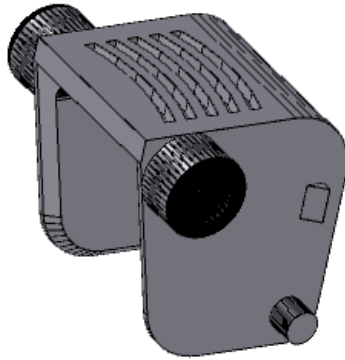


Figura 4.42 - Projeto da tampa do dispensador de bolas

4.5.4.2 Fabrico do dispensador

Após o projeto das peças, imprimiu-se as peças em Tough 1500. A impressão demorou cerca de 9 horas e 15 minutos e resultou numa impressão bem-sucedida cujo resultado se encontra representado na figura 4.43.



Figura 4.43 - Resultado da Impressão do dispensador de bolas

Após a impressão, as peças foram limpas manualmente, devido à presença de canais e de furos onde a resina se pode prender, mas também porque a máquina de lavar ainda não se encontrava operacional. Esta lavagem demorou cerca de 1 hora. Havendo a possibilidade de se ter utilizado a máquina de lavar, o tempo de lavagem teria sido de 20 minutos, e assim ter-se-ia reduzido, de forma significativa, o tempo de tratamento.

A cura é o passo que se segue à lavagem. A cura destas peças é de 60 minutos a 70°C.

Não houve a necessidade de proceder ao pré-aquecimento, uma vez que as peças não apresentavam qualquer pré-requisito para o efeito.

Na figura 4.44 as peças encontram-se dentro da curadora. Note-se o *layout* da disposição das peças bem como a inexistência de suportes ou jangadas de suportes.



Figura 4.44 - Cura das peças do dispensador

Terminada a fase da cura, ocorreu a lixa das peças e uma roscagem no furo do perno. As zonas que mais necessitaram de lixa foram as áreas externas das cascas, visto que foi onde se apoiaram os suportes e ainda os canais onde o veio de empurrão se vai encontrar, de modo que este não faça muita fricção nas paredes.

As peças resultaram nas fotografias 4.45, 4.46, 4.47, 4.48 e 4.49. Nelas também se encontra/representa a montagem final do dispensador.



Figura 4.45 - Casca esquerda do dispensador



Figura 4.46 - Tampa do dispensador



Figura 4.47 - Varão que empurra bolas do dispensador



Figura 4.48 - Interior do dispensador



Figura 4.49 - Dispensador montado

4.6 Discussão de resultados

Neste subcapítulo é abordado o resultado de todas as propostas de melhoria abordadas no estudo de caso, mas antes da discussão é necessário fazer outra auditoria de 5S para verificar se a melhoria foi verificada, na tabela 4.11 encontra-se a última auditoria 5S. Como se observa encontram-se muitos parâmetros no nível 5, sendo a média desta auditoria de 4.125 logo obteve-se nível 4

Tabela 4.11 - Última auditoria 5S

Auditoria 5S - Check List								
Nome do auditor: Miguel Faria					Data: 27/10/2022			
Legenda								
1 - Nunca se verifica 2 - Raramente se verifica 3 - Verifica-se às vezes 4 - Verifica-se muitas vezes 5 - Verifica-se								
5s	Nº	Parâmetro de Avaliação	Nível					Comentários
			1	2	3	4	5	
1º: Senso: Utilização (Seiri)	1.1	Presença de material danificado.	x					Tanques de resina
	1.2	Presença de material sem utilidade.	x					Cartuchos de resina
	1.3	Presença de material de limpeza.					x	Panos de microfibra, limpa-vidros, álcool isopropílico, ...
2º: Senso: Organização (Seiton)	2.1	Presença de materiais, equipamentos desorganizados.	x					Equipamentos de apoio à impressão
	2.2	Presença de informação relevante na área de trabalho.					x	Ficheiros informativos sobre o IPA e o manual de impressão
	2.3	Existência de locais de armazenamento bem identificados e definidos.					x	Armários, locais ventilados
	2.4	Existência de locais de circulação de pessoas e transportadores sem perigo.					x	Sala de reuniões
	2.5	Existência de placas de identificação dos equipamentos.					x	Etiquetas nos equipamentos
3º Senso: Limpeza (Seisō)	3.1	As paredes envolventes, o piso e o teto encontram-se limpos e em bom estado.					x	Sem vestígios de resina, álcool, ...
	3.2	Locais de armazenamento encontram-se limpos.					x	
	3.3	Presença de equipamentos contaminados por resina.		x				Tesouras, tank tool, ...
	3.4	Área da MA encontra-se limpa.					x	Sem vestígios de resina, álcool, ...
	3.5	Presença de fugas de resina ou álcool.	x					Rservatório de álcool, ...
4º Senso: Padronização (Seiketsu)	4.1	Os materiais estão armazenados nos respetivos locais					x	Armários, locais ventilados
	4.2	Os utensílios encontram-se identificados de forma clara.					x	Tesouras, tank tool, ...
	4.3	Existe organização e limpeza da área da MA.					x	Sem vestígios de resina, álcool, ...
5º Senso: Disciplina (Shitsuke)	5.1	Todos os trabalhadores têm conhecimento de como operar com uma					x	Utilização do slicer, manutenção básica, Matriz de competências, ...
	5.2	Desenvolve-se desenhos assistidos por computador através de softwares CAD.					x	IronCad, Solidworks, ...
	5.3	Integra-se impressões no âmbito do Desing for Additive Manufacturing					x	Peças produzidas que utilizam menos material e demorem menos
	5.4	Utiliza-se a MA para prótipos, peças de substituição ou peças finais.					x	Para as linhas de montagem e para linhas de produção
	5.5	A MA encontra-se gerida adequadamente.					x	Integração na tempo de resposta vs necessidade
	5.7	Utiliza-se indicadores para analisar o impacto da implementação da MA.					x	3C, Kaizen, ...
5.8	Os padrões encontram-se e melhoria contínua					x		

4.6.1 Resultados obtidos no projeto

No projeto existiam oportunidades de melhoria relacionadas com a impressão, estas oportunidades foram analisadas em impressões seguintes. As oportunidades de melhoria foram as seguintes:

4.6.1.1.1 Escolha da resina;

O estudo da escolha resina permitiu à empresa projetar uma impressão com melhor decisão e qualidade, ao decidir a resina a utilizar conforme a sua utilização, as impressões resultaram funcionais e com melhor vida útil e eficácia.

4.6.1.1.2 Suporte adequado;

A empresa ao aplicar uma densidade de 0,75 e um ponto de fixação de 1,0mm tem o menor do material desperdiçado para uma impressão com excelente qualidade. Este tipo de suporte permite poupar cerca de 10% quando se utiliza densidades superiores a 0,75 e pontos de fixação menores que 1,0mm, este caso resulta numa poupança de cerca 20%. Apesar desta proposta de melhoria no estudo de caso verificou-se que ao utilizar uma densidade de 0,75 e um ponto de fixação de 0,75 obtém-se uma impressão de boa qualidade e que permite poupar mais material do que proposto.

4.6.1.1.3 Orientação do objeto;

A orientação do objeto tem sido a variante que mais permitiu poupar no desperdício de material, o estudo da orientação do objeto na plataforma de impressão permitiu as impressões tornarem-se melhores tanto na qualidade superficial como na resistência às tensões. A melhoria na orientação permitiu prever situações de *CUP* e situações onde o material iria sofrer tensões elevadas devido à deslocação durante a impressão no eixo z.

4.6.1.1.4 Posição da peça na plataforma de construção;

A colocação da peça mais próxima do laser permitiu reduzir o tempo de impressão em 40 % em todas as impressões realizadas pelo estudo de caso, para peças em que a qualidade superficial supera a velocidade de reação as peças colocadas próximas do *mixer* resultaram em peças sem a presença de resina semicurada e possíveis defeitos.

4.6.2 Resultados obtidos no fabrico

O fabrico é dividido pela fase de lavagem e a fase de cura da peça, estas fases são obrigatórias na impressão, de forma a melhorar estas fases em certos pontos sugeriu-se os pontos presentes na seção 4.4.2.

4.6.2.1 Resultados obtidos na lavagem

4.6.2.1.1 Utilização do solvente

A comparação entre solventes permitiu adquirir novos conhecimentos sobre os solventes existentes no mercado e as suas vantagens e desvantagens, o solvente escolhido IPA, é até ao momento o solvente que se encontra presente na área de MA visto que é o álcool mais utilizado pela fábrica toda, a facilidade de aquisição e o baixo custo comparado com o TPM faz com que este solvente seja o pretendido.

4.6.2.1.2 Tipo de lavagem

A definição de um tipo de lavagem e do tempo que demora cada uma conforme os vários parâmetros permitiu reduzir o tempo de lavagem e assim poupar solvente utilizado e tempo de utilização da máquina de lavar. A diminuição destes parâmetros permitiu uma redução de até 75%, para peças que anteriormente demoravam 20 minutos a serem lavadas, mas através da nova definição de lavagens demoram 5 minutos a serem lavadas. Esta alteração reflete-se na poupança de 5€, por cada lavagem, que ao fim de um ano resulta numa poupança total de 2500€.

4.6.2.1.3 Limpeza do solvente

A criação de um processo cujo objetivo é limpar o solvente utilizado, permite a recuperação de IPA, existindo assim uma poupança do mesmo. Deste modo, a poupança de solvente que ocorre através do processo anteriormente dito, permitiu economizar cerca de 25% do álcool, isto é, para a utilização de 20L de álcool limpo utiliza-se 5L do álcool reutilizado. Esta reutilização traduz-se na poupança de 23,25€, por cada vez que se enche a máquina de lavar com álcool novo.

4.6.2.2 Resultados obtidos na cura

4.6.2.2.1 Pré-aquecimento para várias geometrias

A definição das geometrias que requerem pré-aquecimento permitiu melhorar a qualidade da peça, esta característica é aprimorada devido ao tempo adicional que a peça permanece num ambiente de temperatura mais elevada, geralmente, a 60°C, porém a temperatura da pré-cura pode ser alterada conforme a experiência do utilizador com curadoras, no entanto a maioria

da resina da formlabs são curadas a 70°C e a diferença de 10°C é a ideal e a sugerida pela marca para uma pré-cura.

4.6.2.2.2 *Layout* no disco giratório

A distribuição das várias peças uniformemente radialmente permite as peças serem radiadas pela luz UV uniformemente. Ao associar o pré-aquecimento com a distribuição das peças no *layout* permitiu as peças alcançarem as propriedades mecânicas da resina que são feitas e assim não serem desperdiçadas por não terem as suas propriedades mecânicas ideais.

4.6.3 Resultados obtidos na organização e formação

4.6.3.1 Organização no *layout* e área de Impressão

A alteração da área de Impressão permitiu a utilização constante das máquinas e da sala onde esta se localiza. Nesta nova planta instalou-se um novo sistema de ventilação que permite escoar os gases tóxicos da resina e do IPA e o facto da zona da MA permite agora fazer os tratamentos das peças muito mais rapidamente, uma vez que se situa ao lado da zona de maquinação. Esta mudança também facilitou a manutenção das máquinas e ferramentas de apoio à impressão dado que se encontra todas estas ferramentas e máquinas numa área.

A identificação das zonas de contacto que são limpas permitiu a não contaminação de ferramentas importantes, fazendo com que estas não tenham que ser limpas constantemente e tenham o desgaste superior (visto que a limpeza destas áreas teria que ser com IPA que é corrosivo) que permitiu uma poupança de 100€.

Apesar desta alteração parecer concluída, só se aproxima de tal quando todos os consumíveis se encontrarem dentro da área de MA. Estes consumíveis são os tanques de resina e os cartuchos de resina, que para ocuparem a zona tem que se encontrar numa área desta onde não sofram sujidades e contaminações por parte de outros agentes, como por exemplo o pó.

4.6.3.2 Formação e organização dos funcionários

A formação dos funcionários é necessária quando se aborda uma empresa em que a filosofia *Lean* se encontra presente, bem como a organização dos ficheiros informáticos é obrigatória quando se utiliza vários tipos de ficheiros (CAD, stl e preform) e a consciência dos custos e gerenciamento da MA também, dado que a gestão da impressora utiliza como variantes o custo e o tempo de fabrico.

4.6.3.2.1 Instrução dos funcionários

A formação dos funcionários sobre as capacidades da MA e do processo de fabrico resultou na inclusão da impressão 3D em vários projetos que anteriormente seriam abordados por maquinaria ou pela requisição de apoio a terceiros. A impressão 3D adquiriu vários projetos que apoiavam a maquinaria, mas também libertava os funcionários responsáveis pela maquinaria permitindo-os executarem outras funções.

O manual de impressão que foi introduzido, é um manual que se encontra em constante melhoria sendo alterado frequentemente conforme o que é aprendido em cada projeto. A formação dada aos funcionários garantiu uma aprendizagem aprofundada sobre o assunto e a tecnologia.

4.6.3.2.2 Pasta de Desenhos

Esta sugestão de melhoria apesar de não ter sido implementada, permitia a organização dos ficheiros através da armazenagem dos ficheiros conforme o seu código. A armazenagem organizada como tinha referido anteriormente é necessária quando se utiliza vários tipos de ficheiros, pois caso isso não ocorra pode-se perder ficheiros.

4.6.3.2.3 Ficheiro gerenciamento da MA

Este ficheiro de gerenciamento utilizado para analisar os custos associados ao fabrico da peça permitiu gerenciar melhor vários projetos não só no sentido de custos, mas também para entender a necessidade do fabrico da peça, sendo que caso a peça fosse demasiado cara, interrogava-se a necessidade de fabrico desta.

4.6.3.2.4 Pistola Ionizadora

Apesar da manutenção deste equipamento não ter sido abordado durante o estudo é importante abordar os resultados que implicaram na empresa. A reparação deste equipamento e melhorias impostas nesta permitiram a empresa poupar cerca de 900€ por equipamento. Esta poupança permite utilizar a pistola até esta tenha que ser alterada devido a outros motivos.

4.6.4 Resultado obtido na linha de montagem de motores

O dispensador apresentou qualidades ergonómicas e apresenta solução para todos os problemas levantados, após a projeção o fabrico resultou nas peças desenhadas em CAD. Estas peças fabricadas em Tough 1500 permitiram a poupança de 77,5% de material, visto que ao utilizar o dispensador só se utiliza uma bola, mas quando um funcionário pega nas bolas com a mão este em vez de pegar numa única bola pega em 4 ou 5 bolas e só utiliza uma. Para além

deste desperdício, faz-se sujidade na zona devido às bolas que vão caindo e ficando perto da zona no chão, com a utilização do dispensador o local passou a encontrar-se limpo.

O fabrico e projeto destes dispensadores permitiu fazer uma formação prática dos funcionários, pelo motivo de ter sido a primeira vez que a MA foi executada por completo, ou seja, a impressora, a máquina de lavar e a curadora foram utilizadas.

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

A época em que vivemos caracteriza-se por uma desenfreada competitividade empresarial. Consequentemente, as empresas procuram a aplicação de filosofias que reformem o seu modo de trabalhar, especialmente procurando limar erros e evitar desperdícios que eventualmente existam. A filosofia *Lean* é uma das filosofias que permite aprimorar a eficácia, e conduz a organização à "perfeição".

A concorrência é também um fator a ter em conta, por conseguinte, estas organizações procuram novas formas de executar o seu trabalho, procurando a melhor forma e o menor desperdício. As novas tecnologias, nomeadamente a impressão 3D, permitem a estas organizações alcançar os objetivos.

Na Eugster & Frismag, a filosofia *Lean* já se encontrava presente, colmatando as falhas e desperdícios e integrando novas tecnologias, como a impressão 3D por SLA. No âmbito desta dissertação, constatou-se que investimento neste tipo de impressão 3D viabiliza a produção de várias peças, que anteriormente, devido à sua complexidade ou demora na execução, não eram possíveis. A união resultante da filosofia *Lean* e da impressão 3D permitiu uma considerável redução dos desperdícios, como demonstrado nesta dissertação.

Partindo da análise inicial dos objetivos pretendidos pela empresa, e com o objetivo de integrar as novas máquinas de impressão 3D, recorreu-se às várias ferramentas da filosofia *Lean* e aos seus auxiliares (Kaizen, observação direta, 3C's, auditoria 5S), e verificou-se a existência de vários desperdícios, que se desejava descartar ou reduzir, tais como: a falta de formação dos funcionários (em impressão 3D) no projeto e fabrico, a falta de organização, a falta de limpeza, a falta da noção dos custos que a impressão 3D implica.

Estes problemas foram examinados a pormenor, tendo-se constatado as "causas" e os "efeitos". Por forma a ultrapassar as dificuldades que se apresentaram como "efeitos", foram aplicadas o 3C's e a observação direta.

As dificuldades apuradas resultaram em propostas de melhoria que conduziram a uma melhoria na eficácia da tecnologia. A maioria destas propostas foram implementadas e culminaram numa solução permanente, que permite à empresa crescer e acompanhando a atualidade. As propostas relativas ao projeto e fabrico, passaram pelo apoio à formação dada aos funcionários, bem como, organizá-los e instruí-los para o potencial desta tecnologia. No seu

processo de formação aplicaram-se estas propostas numa linha de montagem tendo assim sido possível demonstrar-lhes o processo e os fins da impressão 3D.

Em conclusão, a implementação das melhorias apuradas, e já mencionadas, resultou numa melhoria da empresa, no que respeita à organização, à redução de desperdício e ao aumento do fluxo de produção (visto que os funcionários começaram a poder realizar outras atividades enquanto se imprime). Conseguiu-se também melhorar a gestão dos custos, do tempo, dos recursos humanos e dos recursos materiais e aprimorou-se a flexibilidade da produção e da produtividade.

A presente investigação prova que a impressão 3D é vantajosa e permite às empresas melhorar continuamente. Não obstante disso, será passível de mais estudos que visem uma tecnologia ainda mais limpa e da qual resultem ainda menos desperdícios.

A utilização da impressão 3D permite ainda uma vasta exploração. Sugere-se, como futura investigação, a procura por uma reutilização total do álcool isopropílico, mais uma vez, contribuindo para a redução de custos e para questões ambientais.

É nosso dever, especialmente nos países mais desenvolvidos, procurar reduzir os desperdícios, e tornar todo o processo de produção menos poluente e mais sustentável. Esta dissertação é um pequeno contributo para o enorme desafio com a Humanidade atualmente se depara.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Augmentir, (2021), *Total Productive Maintenance - What Is It and How Can It Benefit Your Company?*, Acedido em 20 de Julho de 2022, <https://www.augmentir.com/glossary/what-is-total-productive-maintenance>

Bhamu, J. & Sangwan, K., (2014), Lean manufacturing: literature review and research issues, *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 34 No. 7, pp. 876-940, <https://doi.org/10.1108/IJOPM-08-2012-0315>

CA Lawton, (2019), *History of lean*, Acedido em 21 de Julho de 2022, <https://calawton.com/lean-history-part-1/>

Cardoso, P. M. , (1999), *TPM, Uma Filosofia de Futuro, Análise e Implementação de TPM em unidade Industrial*, Porto, Portugal

Douglas, J. A., Antony, J., Douglas, A., (2015), *Waste identification and elimination in HEIs: the role of Lean thinking*, *International Journal of Quality and Reliability Management*, Vol. 32 No.9, pp. 970-981, <https://doi.org/10.1108/IJQRM-10-2014-0160>

Emetrês, (2022), *Resinas 3D para Engenharia da Formlabs Elevada precisão e excelente fiabilidade*, Acedido em 10 de Julho, https://loja.emetres.pt/Loja/Store/Product?ref=C1010&code-Cat=3d_fabric_aditiva_3d_profissional_resinas_engenharia

Eugster/Frismag, (2014), *Our Values Code of Conduct*, Eugster Frismag, Amriswil, Switzerland

Eugster/Frismag, (2022), *Serviços*, Acedido em 3 de Junho de 2022, <https://www.eugster.ch/pt/servicos/>

formlabs, (2022), *Form 3L*, Acedido em 10 de Julho de 2022, <https://formlabs.com/3d-printers/form-3l/>

formlabs, (2022), *Form Cure L*, Acedido em 10 de Julho de 2022, <https://formlabs.com/store/form-cure-l-package-120v/>

formlabs, (2022), *Form Wash L*, Acedido em 10 de Julho de 2022, <https://formlabs.com/store/form-wash-l-package/>

formlabs, (2022), *Grey Pro Resin 1L*, Acedido em 10 de Julho de 2022, <https://formlabs.com/store/grey-pro-resin/> 88

formlabs, (2022), *Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing*, Acedido em 10 de Julho de 2022, <https://formlabs.com/eu/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>

formlabs, (2022), *Resin Family: Flexible and Elastic*, Acedido em 10 de Julho de 2022, <https://formlabs.com/materials/flexible-elastic/>

formlabs, (2022), *Tough 1500 Resin 1L*, Acedido em 10 de Julho de 2022, <https://formlabs.com/store/tough-1500-resin/>

France, A. K., (2014), *Make: 3D Printing*, 1ª ed, Sebastopol, CA, Maker Media.

Gapp, R., Fisher, R. & Kobayashi, K., (2008), Implementing 5S within a Japanese context: an integrated management system, *Management Decision*, Vol. 46 No.4, pp. 565-579, <https://doi.org/10.1108/00251740810865067>

Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B., (2015), *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, New York, USA, Springer.

Gottwald, J. F., (1971), Patent No. 3596285, *Liquid Metal Recorder*, US Patent.

Holweg, M., (2007), The Genealogy of Lean Production, *Journal of Operations Management*, Vol. 25 No.2, pp. 420–437, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jom.2006.04.001>

IPQ, (2007), NP EN 13006:2007, *Terminologia da Manutenção*, Norma Portuguesa

S. Gupta, S. K. Jain (2013), "A literature review of lean manufacturing", *International Journal of Management Science and Engineering Management*, Vol. 8 No.4, pp.241-249, <https://doi.org/10.1080/17509653.2013.825074>

J Jordan, J., (2018), *3D Printing*, London, UK, The MIT Press.

Kato, I. & Smalley, A., (2010), *Toyota Kaizen Methods Six Steps to Improvement*, Nova Iorque, EUA, CRC Press.

Lean Enterprise Institute, (2022), *A brief history of Lean*, Acedido em 25 de Julho de 2022, <https://www.lean.org/explore-lean/a-brief-history-of-lean/>

Lean Institute Brasil, (2022), *Sistema Toyota de Produção*, Acedido em 9 de Setembro de 2022, <https://www.lean.org.br/conceitos/117/sistema-toyota-de-producao-%28toyota-production-system---tps%29.aspx>

Leinster, M., (1945), *Things Pass By*, Thrilling Publishing.

Leksic, I., Stefanic, N. & Veza, I., (2020), *The impact of using different lean manufacturing tools on waste reduction*, Advances in Production Engineering & Management, Vol.15 No. 1 , pp. 81-92, <https://doi.org/10.14743/apem2020.1.351>

Liker, J. K. & Convis, G. L., (2012), *The Toyota Way to Lean Leadership*, New York, USA, McGraw-Hill Education.

Martinelli, J., (2019), *As tecnologias de impressão 3D mais utilizadas: FFF, SLA e SLS*, Acedido em 11 de Julho de 2022, <https://www.inovahouse3d.com.br/post/blog-tecnologias-de-impressao-3d>

Masters, W. E., (1987), No. US4665492A, *Computer Automated Manufacturing Process and System*, US Patent.

Microsoft, (2021), *Criar um fluxograma básico no Visio*, Acedido em 30 de Outubro de 2022, <https://support.microsoft.com/pt-br/office/criar-um-fluxograma-b%C3%A1sico-no-visio-e207d975-4a51-4bfa-a356-eeec314bd276>

Mouris, D., Gouert, C. & Gupta, N., (2020), *Peak your Frequency: Advanced Search of 3D CAD Files in the Fourier Domain*, IEEE Access, Vol. 8, pp. 1, <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3013284>

Mpofu, T. P., Mawere, C. & Mukosera, M., (2014), The Impact and Application of 3D Printing Technology, *International Journal of Science and Research*, pp. 2148-2152.

My3DConcepts, (2017), *How 3D Printing works?*, Acedido em 11 de Julho de 2022, <http://my3dconcepts.com/explore/how-3d-printing-works/>

OECD, (2016), Enabling the next production revolution: The future of manufacturing and services, *Intern Report*, Paris, France.

Ortiz, C. A., (2006), *Kaizen Assembly: Designing, Constructing, and Managing a Lean Assembly Line*, New York, USA, Taylor & Francis.

Pont, J.P. D. & Azzaro-Pantel, C.,(2014), *New Approches to the Process Industries*,Wiley.

Portela, S., (2020), *Como melhorar a qualidade de impressão na área de suporte?*, Acedido em 20 de Outubro de 2022, <https://3dlab.com.br/tag/suporte/>

Roser, C., (2017), *"Faster, Better, Cheaper" in the History of Manufacturing*, Florida, USA, CRC Press.

Rüttimann, B. G. & Stöckli, M. T., (2016), Going beyond Triviality: The Toyota Production System - Lean Manufacturing beyond Muda and Kaizen, *Journal of Service Science and Management*, Vol. 9 No.2, pp. 140-149, <http://dx.doi.org/10.4236/jssm.2016.92018>.

Sacristán, F. R., (1992), *Gestão Industrial*, Barcelona, Espanha, CEAC.

Shah, R. & Ward, P. T., (Março de 2003), "Lean manufacturing: Context, practice bundles, and performance", *Journal of Operations Management*, pp. 129-149.

Skhmot, N., (2017), *What is Lean?*, Acedido em 16 de Janeiro de 2023, <https://theleanway.net/what-is-lean>

Tarantino, A., (2022), *Smart Manufacturing*, New Jersey, USA, Wiley.

University of Cambridge, (2022), *Improving Improvement*, Acedido em 17 de Janeiro de 2023, <https://www.iitoolkit.com/improvement/lean.html>

Velki, (2022), *Como o sistema One Piece Flow pode agilizar a sua linha de produção?*, Acedido em 11 de Janeiro de 2023, <https://velki.com.br/pt/blog/novidades/como-o-sistema-one-piece-flow-pode-agilizar-sua-linha-de-producao->

Womack, J. P. & Jones, D. T., (1996), *Lean Thinking Banish waste and create wealth in your corporation*, N, USA, Free Press.

Womack, J. P., Jones, D. T. & Roos, D., (1990), *The machine that changed the world*, New York, USA, Simon and Schuster.

ANEXOS

Anexo A. Relação entre materiais e resinas

Tabela A. 1 - Semelhanças entre vários materiais e resinas

ABS/PC		
Característica	Resina Equivalente	Propriedades Relacionadas com o Material
Design (Design Space)	Tough 2000 Resin	Rigidez
	Grey Pro Resin Rigid Resin	
Ambiente de Operação (Operating Environment)	Tough 2000 Resin	Resistência Moderada à Temperatura
	Grey Pro Resin Rigid Resin	
Durabilidade (Durability)	Durable Resin	Dureza
	Tough 1500 Resin Tough 2000 Resin	


LDPE/HDPE/PP (Polipropileno)		
Característica	Resina Equivalente	Propriedades Relacionadas com o Material
Design (Design Space)	Durable Resin	Flexibilidade Baixa Fricção
	Tough 1500 Resin	
Durabilidade (Durability)	Durable Resin	Dureza
	Tough 1500 Resin Tough 2000 Resin	

POM/ACETAL/DELTRIN		
Característica	Resina Equivalente	Propriedades Relacionadas com o Material
Design (Design Space)	Rigid Resin	Elevada Rigidez
	High Temp Resin	
	Durable Resin	Baixa Fricção
Ambiente de Operação (Operating Environment)	High Temp Resin	Resistência Elevada à Temperatura

BORRACHA DE SILICONE		
Característica	Resina Equivalente	Propriedades Relacionadas com o Material
Design (Design Space)	Elastic 50A Resin	Suavidade
	Elastic 50A Resin Flexible 80A Resin	Flexibilidade
Tensão de Corte (Tear Strength)	Elastic 50A Resin Flexible 80A Resin	Durabilidade

TPU/BORRACHA NATURAL		
Característica	Resina Equivalente	Propriedades Relacionadas com o Material
Design (Design Space)	Flexible 80A Resin	Suavidade
	Rebound Resin	
	Elastic 50A Resin Flexible 80A Resin	Flexibilidade
	Rebound Resin	
Durabilidade (Durability)	Elastic 50A Resin Flexible 80A Resin	Tensão de Corte

LEGENDA

 - Resina que contém todas as propriedades do material

Anexo B. Procedimento de Impressão 3D

Eugster Frismag AG

Procedimento de Impressão 3D

Miguel Faria

Do Desenho Virtual á Peça Real

Para imprimir uma peça é necessário analisar as seguintes condições:

- Se a produção da peça for **em série** a impressora 3D é mais eficaz, sendo mais rápida que a maquinação das peças, a MA é superior quando se produz em quantidades superiores a 3 peças;
- Se a função da peça for **desgastes, tensões ou forças** que só um metal suporta não existe resina que supere esses parâmetros logo a MA não é sugerida;
- Caso a impressão seja uma **peça protótipo** a MA é melhor que a maquinação pois permite os funcionários continuarem as suas operações sem se preocuparem com a fabricação da peça, para além do custo da impressão 3D ser menor;

NOTA: Para prever os custos associados á impressão 3D consulte o Excel : “[Resinas a utilizar.xlsx](#)”

A. Procedimento de Impressão

Para imprimir deve-se seguir os seguintes passos:

- 1) Desenhe a peça através do CAD (Desenho assistido por Computador);
- 2) Exporte a peça no formato **.stl**;
- 3) Através da aplicação do *Formlabs*, o **Preform**, importe a peça para a aplicação;
- 4) Defina o tipo de impressora que se tem presente – Form 3L;

The screenshot displays the PreForm software interface, which is divided into several sections for configuring a 3D print job. On the right side, there is a 'Job Setup' panel with a close button (X) and four main settings: 1. Printer (XeniaMulgara), 2. Material (Tough 1500 V1), 3. Layer Thickness (0.050 mm), and 4. Print Settings (Default). Below these are fields for 'Job Name' and a 'Show All' toggle.

The main interface is organized into four numbered steps:

- 1 Choose Printer:** This section allows the user to select a printer. It features a 'Printer Type' filter with buttons for Form 2, Form 3/3+, Form 3B/3B+, Form 3L (selected), Form 3BL, and Fuse 1. A search bar is present. Below, a table lists available printers. The 'Form 3L' is highlighted, with details: 'Form 3L SLA 3D Printer, 335 x 200 x 300 mm. No Form 3L printers have been found. To add a new printer, go to File > Devices > Add New Printer. Learn More'.
- 2 Choose Material:** This section offers various material options, each with a representative image. The 'Tough 1500' material is selected. Other options include Black, Castable, Clear, Color, Draft, Durable, ESD, Elastic 50A, Flexible 80A, Grey, Grey Pro, High Temp, Model, Rigid 10K, Rigid 4000, and Tough 2000. A 'Use Printer's Material' button is also visible.
- 3 Choose Layer Thickness:** This section shows two options: 0.100 mm and 0.050 mm. The 0.050 mm option is selected, indicated by a blue checkmark.
- 4 Choose Print Settings:** This section shows two settings: 'Default' and 'Beta'. The 'Default' setting is selected, indicated by a blue checkmark.

Figura A. 1 - Exemplo do PreForm

- 5) Escolha a Resina pretendida;
 - a) Caso seja uma peça protótipo a resina **Grey Pro Resin** é a ideal visto que suporta forças superiores às resinas que se encontram na empresa, assim permite verificar se a peça é viável sendo impressa, se a peça não aguentar as forças ou tensões deve-se fazer uma peça através da maquinação;
 - b) Caso a peça seja para industrialização ou manutenção com o intuito de aguentar forças de impacto ou ser uma peça estática é preferível usar-se a **Tough 1500**;
 - c) Caso a peça tenha que ser flexível e que aguente extensões repetitivas utiliza-se a **Flexible 80**;
 - d) Nos Anexos encontra-se uma folha de resinas que compara resinas com materiais utilizados (tópico VI).

AVISO: Para utilizar outra resina diferente da que se encontra na impressora têm que mudar o tanque de resina e os cartuchos de resina, a reposição de cartuchos encontra-se no tópico IV.A.4.c).

- 6) Após escolher a resina deve-se escolher a espessura por camada que por predefinição é 0,1 mm, esta espessura deve ser escolhida quando se pretende uma peça mais grosseira, para peças com uma qualidade superficial e tensões superiores utiliza-se uma espessura de 0,050 mm, mas existe uma maior utilização de resina e do tempo de impressão;
- 7) O tipo de impressão mais comum é o **default**, esta impressão utiliza as estruturas de suporte normais da resina utilizada enquanto o **beta** utiliza suportes que estão a ser estudados pela **FORMLABS**;
- 8) Relativamente á orientação da peça o próximo parâmetro neste relatório – Boas Práticas para Impressão 3D para a FORM 3L(tópico III)– explica como se deve orientar a impressão;
- 9) Clique no botão laranja;
- 10) Escolha a impressora – *XenialMulgara*;
- 11) Escreva o nome da impressora no *Job Name*;
- 12) Clique no botão laranja que diz *Upload Job*;
- 13) Após a impressora receber o ficheiro confirme se pretende imprimir o ficheiro enviado ou não, para imprimir clique em *print*;

B. Procedimento de Limpeza de Resíduos

Após a impressão da peça é preciso fazer a limpeza da peça da resina que não foi curada na impressão. Para isso utiliza-se o equipamento na *Imagem 2*, a *Form Wash L*. Antes da limpeza é preciso ter o seguinte cuidado de a peça **não ultrapassar o volume de 20,1 L e de 7,5 L de volume fechado na máquina** porque requer retirar solvente do equipamento, devido á ocorrência de transbordo do solvente.

Após verificado este cuidado pode-se limpar a peça, para tal segue-se os seguintes passos:

1. Retire a plataforma de construção da impressora – Form 3L;
2. Utilize o ecrã principal para subir a plataforma de limpeza;

3. Insira a Plataforma de construção com as partes impressas, como apresentado na *figura 5*. Deve-se alinhar o topo da Plataforma com os braços da máquina e permitir a plataforma encostar-se á porta da máquina;
 - a) Caso as peças estejam fora da plataforma de construção deixe as peças no cesto que se encontra na impressora;

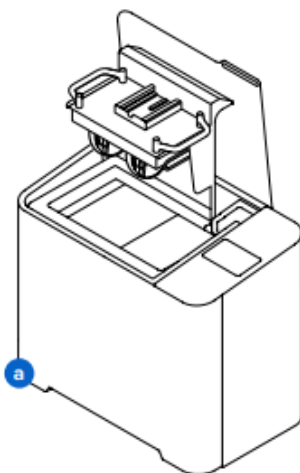


Figura A. 2 - Ilustração da Wash L

4. As máquinas têm modos de limpeza de padrão, mas também permite inserir o tempo de limpeza automaticamente. Estes modos de limpeza devem ser utilizados conforme a peça impressa (visto que a geometria pode variar o tipo de limpeza), o tipo de resina utilizado e a quantidade de solvente presente na máquina.
 - (i) Para peças complexas (peças ocas, peças com canais internos e peças com concavas) sugere-se uma lavagem mais prolongada sendo assim faz-se uma lavagem de **20 minutos**, isto é, uma **long wash**, também caso o solvente tenha sido usado, sem ter sido reciclado, mais que 3 vezes é sugerido fazer estas lavagens longas. Para os outros tipos de lavagem deve-se ter um critério de geometria presente, mas também a necessidade da peça. Uma lavagem rápida, **quick wash**, dura **5 minutos** e uma lavagem normal, **default wash**, demora **10 minutos**;
 - (ii) O tipo de resina e a quantidade de solvente encontram-se no capítulo III.B.
5. Após a limpeza a máquina irá dispor a peça inclinada, esta ação ocorre para retirar o solvente que pode ter ficado retido na peça. A peça deve ficar nesta posição durante **30 minutos** para deixar sair o solvente que se encontra em evaporação;

NOTA: Aconselha-se a limpeza da peça com toalhas de forma a enxaguar o solvente.

A limpeza das peças pode também ser feita manualmente e é recomendada para algumas peças (presentes no capítulo III.B), este tipo de limpeza encontra-se descrito abaixo:

1. Retire a plataforma de construção;
2. Com os utensílios de remoção, retire as peças da plataforma com cuidado;

3. Para limpar as peças utilize o álcool isopropílico que se encontra numa conta gotas com uma etiqueta que diz álcool para além do álcool utilize um reservatório por baixo da peça de forma a reter o solvente e a sujidade;
 - i. Largue álcool na peça e espalhe por toda a peça. De forma a ter uma melhor perceção dos pontos essenciais para imprimir veja o [capítulo II.B](#);
 - ii. Deixe o álcool pousar na peça entre 10 a 15 minutos;
 - iii. Após este tempo lave as peças com água, irá ver a resina misturada com álcool a ser liberta da peça;
 - iv. Deixe repousar uns 4/5 minutos;
 - v. Seque as peças com papel.

C. Processo de Cura

Depois do processo de limpeza, ocorre a cura da peça que acontece na máquina – *Form Cure L* - que se encontra presente na *imagem 3*.

Para se curar a peça coloca-se a peça no interior da curadora no seu disco giratório, caso exista mais que uma peça é preciso distanciar as peças uma das outras de forma uniforme para que sejam todas curadas uniformemente. Existem boas práticas essenciais para a curadora que se encontram no capítulo III.A.

O processo de cura define-se segundo os seguintes passos:

1. Abra a porta da curadora e insira as peças dentro da mesma;
2. Ligue a máquina e clique no **Cure**;
3. Escolhe-se o **PreSet** consoante a resina utilizada (os tempos e temperatura para cada resina encontra-se na tabela abaixo);

Tabela A. 2 - Tempo e Temperatura de Cura para cada Resina

Resina	Versão	Tempo de Cura [mins.]	Temperatura da Cura [mins.]	Aumento Tensão com a Cura
Tough 1500	V1	60	70	27%
Tough 2000	V1	60	70	83%
Grey Pro	V1	15	80	78%
Rigid 10K	V1	60	70	180%
Rigid 4000	V1	15	80	116%
Durable	V1	60	60	131%
High Temp	V1	30	60	131%
Flexible 80A	V1	10	60	140%

4. Para além do **PreSet** aplica-se o pré-aquecimento da peça que permite a peça chegar a uma temperatura um pouco abaixo a temperatura de cura durante 10 minutos.
5. Clica-se no **Start** após as configurações aparecerem conforme a tabela;
6. A máquina avisa quando termina a cura no seu ecrã e as luzes UV se desligarem.

D. Processo Final

Pós cura ou Pós lavagem é necessário retirar os suportes da peça que foram impressos com a mesma, para isso utiliza-se tesouras e luvas não reativas de forma a retirar estes pedaços de resina solidificada. Para além disso é aconselhado a utilização de proteção visual visto que esta resina pode libertar estilhaços que podem prejudicar a saúde do manuseador.

Quando todos os processos são terminados mete-se as máquinas em **sleep mode**, esta função permite as máquinas entrarem em modo de suspensão, não se desligando da rede, mas entrando em modo de economia de energia não consumindo energia como se tivessem ligadas. Este modo é imposto segundo os seguintes passos:

1. Clique no icon da chave inglesa que se encontra à esquerda no *display*. O ecrã de Settings deve aparecer;
2. Selecionar a opção de *sleep mode*;
3. Clique no **sleep**.

A curadora e a máquina de limpar não têm a função de **sleep mode**, então para estas se desligarem têm se que clicar no **botão on/off** presente no painel traseiro das máquinas, este botão encontra-se acima da ficha de alimentação da máquina



2022/2023

Miguel Faria

Melhoria dos processos de projeto e fabrico aditivo numa empresa industrial