



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Modelo de Custos para Processos de Produção Rápida

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

Autor

Vera Lúcia Lopes Lourenço

Orientador

Professor Doutor Cristóvão Silva

Júri

Presidente Professora Doutora Maria Teresa Freire Vieira
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Doutora Ana Rita Torres dos Santos Farinha
Investigadora Auxiliar da Universidade de Coimbra
Professor Doutor Cristóvão Silva
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2014

“Para ser grande, sê inteiro.
Nada teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa.
Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda brilha,
Porque alta vive.”
Fernando Pessoa

Em memória do meu avô António Lopes.

Agradecimentos

Desejo agradecer a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, com todo o meu amor e gratidão, por tudo o que fizeram por mim ao longo da minha vida e por sempre acreditarem na minha vitória.

Aos meus colegas, que me acompanharam ao longo deste percurso, pelo companheirismo e pelo apoio no desenvolvimento desta tese.

A todos os Professores do curso de Engenharia e Gestão Industrial, em especial o Professor Doutor Cristóvão Silva pela paciência, pelos conhecimentos transmitidos e pela ajuda na elaboração deste trabalho.

Resumo

A produção rápida é um processo relativamente novo derivado de tecnologias desenvolvidas para a prototipagem rápida para a obtenção de protótipos. As tecnologias de produção rápida têm como objetivo a produção de peças finais, através do princípio de adição de camadas e com o mínimo desperdício de material, a partir de um modelo tridimensional em CAD.

Para justificar o potencial destas técnicas, este trabalho inclui informação sobre os benefícios da produção rápida tais como a redução do desperdício de material utilizado na produção de peças e o impacto na customização em massa e na cadeia de abastecimento.

O presente trabalho apresenta ainda um modelo de custos relativo a estas tecnologias aditivas e uma análise do mesmo, de forma a evidenciar que a produção rápida pode ser competitiva e economicamente vantajosa em relação a tecnologias subtrativas.

Palavras-chave: Produção Rápida, Modelo de Custos, Peças Metálicas, SLM

Abstract

Rapid Manufacturing (RM) is a relatively new process derived from technologies developed for rapid prototyping for obtaining prototypes. The rapid manufacturing technologies aim to produce final pieces, through the principle of adding layers and with minimal waste of material, from a three-dimensional CAD model.

To justify the potential of these techniques, this paper includes information on the benefits of the rapid manufacturing such as the reduction of waste material used in the production of parts and the impact on mass customization and supply chain.

This work also presents a cost model for these additive technologies and an analysis of the same costs, in order to show that rapid manufacturing can be competitive and economically convenient compared to subtractive technologies.

Keywords Rapid Manufacturing, Cost Model, Metal Parts, SLM

Índice

| | |
|---|------|
| Índice de Figuras | xi |
| Índice de Tabelas | xiii |
| Siglas | xv |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO | 3 |
| 2.1. Produção Rápida | 3 |
| 2.2. Prototipagem Rápida | 3 |
| 2.3. Processos Subtrativos | 6 |
| 2.3.1. Controlo Numérico Computadorizado (CNC) | 6 |
| 2.3.2. Maquinagem de Alta Velocidade (HSM – <i>High Speed Machining</i>) | 7 |
| 2.3.3. Maquinagem por Eletro-Erosão (EDM – <i>Electrical Discharge Machining</i>) .. | 7 |
| 3. Produção RÁPIDA | 9 |
| 3.1. Tecnologias Existentes | 12 |
| 3.1.1. Estereolitografia (SLA – <i>Stereolithography Apparatus</i>) | 13 |
| 3.1.2. Sinterização Seletiva a Laser (SLS – <i>Selective Laser Sintering</i>) | 14 |
| 3.1.3. Modelação por Fusão e Deposição (FDM – <i>Fused Deposition Modelling</i>) .. | 14 |
| 3.1.4. Impressão a 3D (3DP – <i>Three Dimensional Printing</i>) | 15 |
| 3.1.5. Sinterização Direta de Metal a Laser (DMLS – <i>Direct Metal Laser Sintering</i>) | 16 |
| 3.1.6. Fusão Seletiva a Laser (SLM – <i>Selective Laser Melting</i>) | 16 |
| 3.1.7. Fusão por Feixe de Eletrões (EBM – <i>Electron Beam Melting</i>) | 17 |
| 3.2. Comparação de Processos | 18 |
| 3.3. Análise SWOT da Produção Rápida | 20 |
| 3.4. Impacto da Produção Rápida na Customização em Massa | 22 |
| 3.5. Impacto da Produção Rápida na Cadeia de Abastecimento | 22 |
| 3.6. Impacto da Produção Rápida nas Competências dos Operários | 24 |
| 4. ANÁLISE DE CUSTOS | 25 |
| 4.1. Descrição do Modelo de Custos | 25 |
| 4.1.1. Custo de Processamento | 31 |
| 4.1.2. Custo de Material | 31 |
| 4.1.3. Custo do Consumo de Energia | 32 |
| 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS | 33 |
| 6. CONCLUSÕES | 37 |
| 6.1. Futuros Desenvolvimentos | 38 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 39 |
| ANEXO A | 43 |
| ANEXO B | 44 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Exemplos de áreas de aplicação da produção rápida. | 1 |
| Figura 2. Fases de produção a partir do modelo CAD. | 4 |
| Figura 3. Princípio da prototipagem rápida. | 5 |
| Figura 4. Principais diferenças entre os processos subtrativos e a prototipagem rápida. | 6 |
| Figura 5. Diferença entre prototipagem rápida e produção rápida. | 10 |
| Figura 6. Vantagens e desvantagens da produção rápida. | 11 |
| Figura 7. Principais processos aditivos. | 12 |
| Figura 8. Princípio de funcionamento do processo SLA. | 13 |
| Figura 9. Princípio de funcionamento do processo SLS. | 14 |
| Figura 10. Princípio de funcionamento do processo FDM. | 15 |
| Figura 11. Princípio de funcionamento do processo 3DP. | 15 |
| Figura 12. Princípio de funcionamento do processo DMLS. | 16 |
| Figura 13. Princípio de funcionamento do processo SLM. | 17 |
| Figura 14. Princípio de funcionamento do processo EBM. | 18 |
| Figura 15. Comparação ente cadeia de abastecimento ágil e “lean” | 24 |
| Figura 16. <i>Laser Beam Melting System SLM 125 HL</i> | 26 |
| Figura 17. Categorias de custos presentes no modelo. | 33 |
| Figura 18. Sensibilidade do modelo em relação às horas por ano. | 34 |
| Figura 19. Sensibilidade do modelo em relação ao tempo de <i>set-up</i> | 35 |
| Figura 20. Sensibilidade do modelo em relação ao tempo de pós-processamento. | 35 |
| Figura 21. Sensibilidade do modelo em relação ao número de unidades por construção. ... | 36 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Vantagens e desvantagens da prototipagem rápida. | 5 |
| Tabela 2. Vantagens e desvantagens dos processos de produção rápida..... | 18 |
| Tabela 3. Análise SWOT da produção rápida. | 21 |
| Tabela 4. Principais características da máquina <i>Laser Beam Melting System SLM 125 HL</i> | 26 |
| Tabela 5. Diferentes categorias de custos propostas pelos autores dos modelos. | 27 |
| Tabela 6. Principais características dos modelos analisados. | 27 |
| Tabela 7. Pressupostos dos modelos considerados por cada autor..... | 28 |
| Tabela 8. Equações usadas para o cálculo do preço de cada unidade. | 30 |
| Tabela 9. Cálculo do custo de processamento por unidade produzida. | 31 |
| Tabela 10. Cálculo do custo de material por unidade produzida..... | 32 |
| Tabela 11. Cálculo do custo do consumo de energia por unidade produzida. | 32 |

SIGLAS

3DP – Impressão a 3D (Three Dimensional Printing)

CAD – Computer Aided Design

CNC – Controlo Numérico Computadorizado

DMLS – Sinterização Direta de Metal a Laser (Direct Metal Laser Sintering)

EBM – Fusão por Feixe de Eletrões (Electron Beam Melting)

FDM – Modelação por Fusão e Deposição (Fused Deposition Modelling)

HSM – High Speed Machining, Maquinagem de Alta Velocidade

EDM – Electrical Discharge Machining, Maquinagem por Eletro-Erosão

PA – Produção Aditiva

PC – Produção por Camadas

PR – Prototipagem Rápida

SFF – Solid Freeform Fabrication

SLA – Estereolitografia (Stereolithography Apparatus)

SLM – Fusão Seletiva a Laser (Selective Laser Melting)

SLS – Sinterização Seletiva a Laser (Selective Laser Sintering)

1. INTRODUÇÃO

As técnicas de produção rápida emergiram nos últimos 20 anos, inicialmente conhecidas por prototipagem rápida. No início, a produção rápida era usada para a produção de protótipos, principalmente em plástico, tendo evoluído para a produção de peças finais completamente funcionais em diversos materiais.

A produção rápida consiste na produção de uma peça final, recorrendo a um modelo virtual e através do princípio de adição de material camada por camada, eliminando muitas limitações dos processos subtrativos e tornando-se um processo revolucionário por reduzir o ciclo de produção. Com esta tecnologia podem ser produzidas peças únicas e complexas, mudando a forma como se aplica o conceito de customização em massa, existindo para esse objetivo vários processos que podem ser usados, sendo que cada um deles tem pontos fortes e fracos que os tornam adequados para algumas aplicações e para outras não. Desta forma, a produção rápida tem uma grande importância pois permite manter a competitividade, oferecendo produtos de alta qualidade, com menores tempos de entrega e dando valor à diferenciação dos mesmos.

Existem diversas áreas onde estas tecnologias aditivas se aplicam e fazem a diferença, sendo o caso da produção de próteses na área médica e a produção de diversos componentes tanto na indústria automóvel como na aeronáutica.



Figura 1. Exemplos de áreas de aplicação da produção rápida.

Contudo, apesar de estas tecnologias estarem em crescimento contínuo, existem ainda muitas dúvidas sobre se conseguem ser competitivas em relação às técnicas subtrativas. Desta forma, e para ajudar a responder a esta questão, o presente trabalho apresenta um modelo de custos de um processo de produção rápida, para produção de componentes metálicos, e a sua análise para uma melhor compreensão deste tema e para evidenciar que a produção rápida pode ser competitiva e economicamente vantajosa em relação a tecnologias subtrativas.

2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo é feita a exposição dos principais conceitos utilizados ao longo deste trabalho. Desta forma, é apresentado o conceito de produção rápida sendo feita uma breve descrição das suas principais tecnologias.

2.1. Produção Rápida

O conceito de produção rápida (*Rapid Manufacturing*) deriva de tecnologias previamente desenvolvidas para a prototipagem rápida (*Rapid Prototyping*), sendo considerado uma evolução das mesmas (Kruth *et al.*, 2005).

2.2. Prototipagem Rápida

De forma a manter a competitividade, as empresas têm de conseguir satisfazer os clientes em aspetos como a alta qualidade do produto, menores tempos da entrega do mesmo e custos razoáveis, apostando assim na diferenciação e na especificação do produto (IC Learning Series, 2012). Desta forma, a prototipagem rápida tornou-se uma ferramenta competitiva para as empresas pois reduz tanto o tempo do desenvolvimento do produto, otimizando toda a sua produção, assim como os seus custos.

Segundo Carvalho e Volpato (2007), a prototipagem rápida é um processo de fabrico através da adição de material em forma de camadas consecutivas, diferenciando-se dos processos subtrativos que implicam a remoção do material.

A prototipagem rápida permite a criação de modelos físicos em três dimensões, de forma automática e flexível, através de um modelo geométrico gerado no sistema CAD (*Computer Aided Design*), que deposita as várias camadas do material e sem a necessidade de qualquer ferramenta tradicional, (Carvalho e Volpato, 2007). A Figura 2 representa as fases de produção a partir de um modelo CAD.

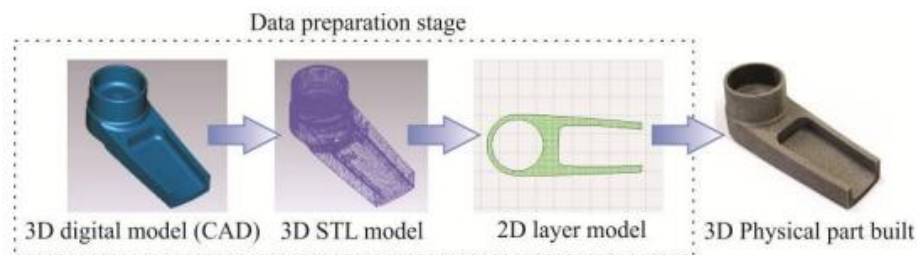


Figura 2. Fases de produção a partir do modelo CAD.

Fonte: Bineli *et al.* (2011)

Segundo Bessa (2006), os principais objetivos da prototipagem rápida passam pela diminuição do tempo de desenvolvimento de um produto assim como os problemas de engenharia que podem decorrer ao longo dessa etapa de produção, o aumento de vida do produto e a redução do tempo de construção de um protótipo convencional.

O protótipo tem como objetivo auxiliar no processo de desenvolvimento do produto, sendo uma aproximação do mesmo, para que desta forma se analise a sua funcionalidade antes de se passar à fase de produção, detetando assim problemas e evitando erros (IC Learning Series, 2012).

Segundo Bessa (2006), os protótipos são “modelos funcionais construídos a partir de especificações preliminares para simular a aparência e a funcionalidade, ainda que de forma primitiva e incompleta, de um projeto a ser desenvolvido.”

Na tabela seguinte são apresentadas as vantagens e desvantagens da prototipagem rápida.

Tabela 1. Vantagens e desvantagens da prototipagem rápida.

Fontes: Bertol (2008), Campanelli *et al.* (2010), Hejmadi e McAlea (1996) e Vasconcelos *et al.* (2001)

| Vantagens | Desvantagens |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Minimiza erros devido ao facto do modelo CAD não necessitar de muita intervenção humana, e de ser feito numa fase precoce do desenvolvimento do produto; - Fabrico de peças complexas e em tempos reduzidos, tornando-se um processo vantajoso em relação aos processos subtrativos; - Minimiza os custos de desenvolvimento do produto; - O componente é produzido numa única etapa e num único equipamento, dispensando o uso de moldes e ferramentas; - Não há desperdício de material contrariamente aos processos subtrativos; | <ul style="list-style-type: none"> - O protótipo não reflete todas as características do produto final; - Limitado a uma gama de materiais; - Acabamento superficial e precisão inferiores em relação aos processos subtrativos; - Devido aos custos de cada protótipo, a quantidade produzida é limitada; |

Segundo Gorni (2001), todos os processos de prototipagem rápida compreendem as seguintes etapas básicas, que se repetem as vezes necessárias até o protótipo estar concluído, Figura 3:

**Figura 3.** Princípio da prototipagem rápida.

2.3. Processos Subtrativos

Os processos subtrativos, baseados em modelos 2D, consistem na remoção do material a partir da forma inicial de um bloco até se ter a forma desejada da peça, no entanto, estes processos são dependentes da complexidade da geometria, contrariamente às tecnologias de prototipagem rápida (Bineli *et al.*, 2011). Na Figura 4 apresentam-se as principais diferenças entre processos de fabrico subtrativos e a prototipagem rápida.

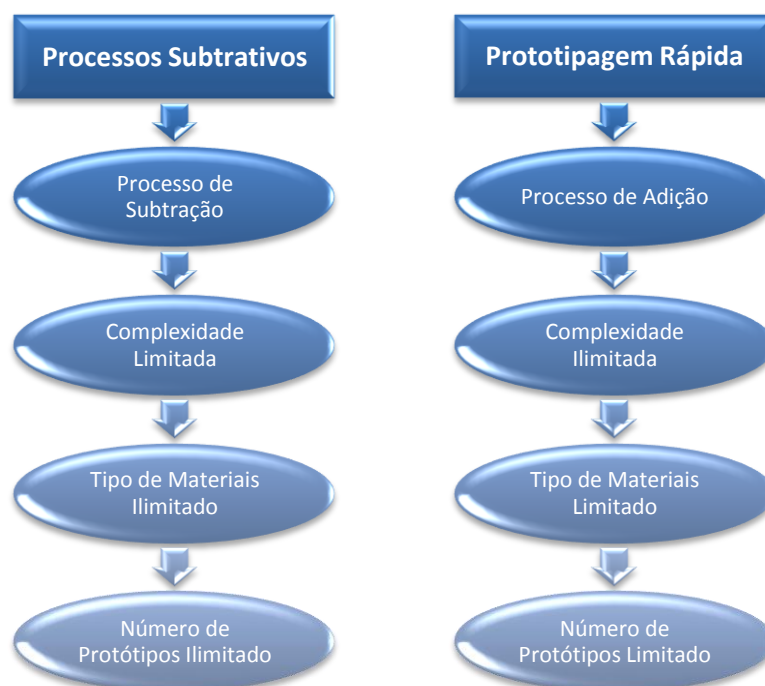


Figura 4. Principais diferenças entre os processos subtrativos e a prototipagem rápida.

Fonte: Adaptado de (IC Learning Series, 2012)

2.3.1. Controlo Numérico Computadorizado (CNC)

Esta tecnologia foi desenvolvida por John Parsons em 1947 e consiste em controlar uma máquina por computador, dando-se a remoção do material a partir de um bloco sólido até se obter a forma desejada, após modelar a peça em CAD.

Os protótipos produzidos com esta tecnologia apresentam maior resistência mecânica do que a apresentada pelos processos aditivos (Relvas, 2002).

2.3.2. Maquinagem de Alta Velocidade (HSM – *High Speed Machining*)

Esta tecnologia foi desenvolvida por Salomon em 1931 e, fazendo uso do CNC, vai maquinar a forma do modelo a partir de um bloco de material.

O facto de ser um processo a altas velocidades permite uma maior taxa de remoção de material, diminuindo assim tempos e custos de produção e aumentando a qualidade da peça (Bertol, 2008).

2.3.3. Maquinagem por Eletro-Erosão (EDM – *Electrical Discharge Machining*)

Surgiu em meados do século XX e é uma tecnologia baseada no princípio da remoção do material por aquecimento, através de uma corrente elétrica entre o eletrodo e a peça.

Não sendo necessária a aplicação de força e sendo uma tecnologia controlada automaticamente, permite produzir geometrias complexas e com alta precisão (Mesquita e Marques, 1990).

3. PRODUÇÃO RÁPIDA

Vários termos são usados por diferentes autores para descrever o mesmo processo de produção baseado no princípio aditivo, não havendo ainda um consenso sobre que termo adotar.

Para Kumar e Pityana (2011), a produção rápida pode adotar outros nomes como Produção Aditiva (*Additive Manufacturing*) ou Produção por Camadas (*Layer Manufacturing*), sendo o objetivo o mesmo, isto é, a produção de produtos finais pelo princípio baseado no processo camada por camada, fazendo uso de um modelo CAD.

Segundo Gorni (2013), estas técnicas aditivas receberam ao longo do tempo nomes diferentes, tais como Prototipagem Rápida, Produção Rápida, Impressão Tridimensional ou Produção Aditiva, tendo este autor adotado, nos seus trabalhos, o termo de Produção Aditiva, considerando esta uma evolução da prototipagem rápida.

Para Kellens *et al.* (2011), as técnicas aditivas existentes são chamadas de técnicas SFF (*Solid Freeform Fabrication*) que permitem a produção de peças com o mínimo desperdício de material.

Segundo Mancares *et al.* (2013), as tecnologias de impressão 3D permitem otimizar a etapa do desenvolvimento do produto, reduzindo assim tempos e permitindo a entrada do produto no mercado mais cedo.

Para Hopkinson e Dickens (2001), quando as tecnologias de prototipagem rápida são usadas para o fabrico de produtos finais, a partir de um modelo tridimensional em CAD e através da adição de material em camadas, passamos a ter um processo conhecido por produção rápida.

Neste trabalho, e por ter sido o termo mais usado a nível internacional por diversos autores, adotou-se o termo Produção Rápida. Desta forma, a produção rápida pode ser definida, de forma geral, como sendo o processo que, através de tecnologias aditivas, produz objetos tridimensionais como produtos finais.

No entanto, e apesar de um ser a evolução do outro, existe um desentendimento em relação aos conceitos de prototipagem rápida e produção rápida, sendo necessário fazer uma distinção entre eles (Kruth *et al.*, 2007), ver Figura 5.

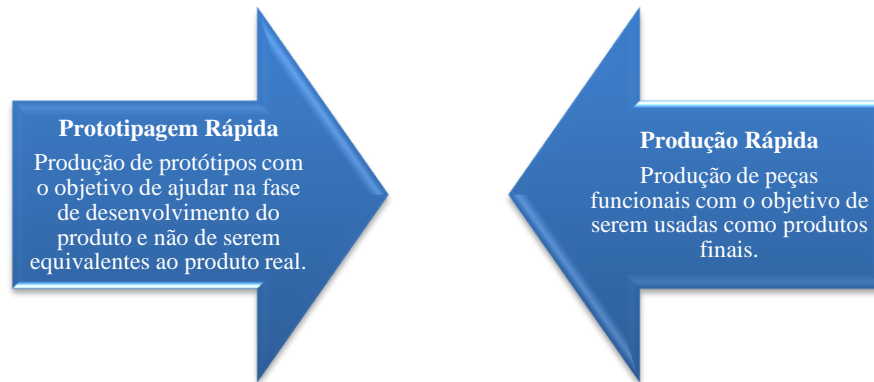


Figura 5. Diferença entre prototipagem rápida e produção rápida.

Segundo Nichita (2007), as técnicas de produção rápida foram desenvolvidas para revolucionar os processos subtrativos de produção sendo bastante mais flexíveis e reduzindo o tempo da etapa de desenvolvimento do produto e, conseqüentemente, o ciclo de produção. Este processo consegue produzir um produto numa só etapa adicionando camadas sucessivas de material, e apesar de não ser um processo tão rápido, para um maior número de produtos, como os processos subtrativos, tem a vantagem de eliminar qualquer necessidade de uso de ferramentas e montagem de peças. Consegue, ainda, produzir peças com geometrias complexas e alta qualidade, sendo um processo ideal na produção de peças customizadas.

A decisão de optar por estas técnicas de fabrico deve ser feita conscientemente e tendo em conta as suas vantagens e desvantagens, ilustradas na Figura 6.

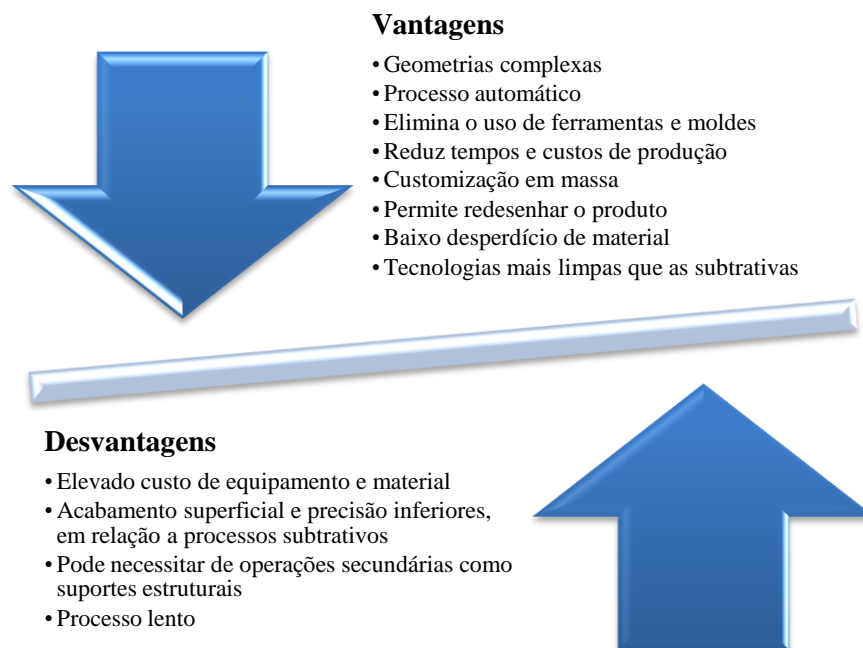


Figura 6. Vantagens e desvantagens da produção rápida.

Segundo White e Lynskey (2013), a produção rápida é um processo recente, estando ainda no seu estado inicial de desenvolvimento, mas revolucionário, e na mesma linha de pensamento, Gorni (2013) considera que apesar, de reduzir os custos envolvidos, ainda tem muito que evoluir, apresentando como aspetos que devem ser corrigidos, os seguintes:

- Baixa velocidade de produção;
- Baixos volumes de peças produzidas;
- Especificações técnicas e dados das propriedades dos materiais em falta;
- Acabamento superficial inferior assim como a presença de porosidade.

3.1. Tecnologias Existentes

Atualmente existem muitas tecnologias baseadas no princípio aditivo, que têm vindo a ser desenvolvidas há mais de 20 anos, no entanto, existem sempre novos materiais a entrar no mercado dando origem a novos processos ou a mudanças dos que já existem (Relvas, 2002). Contudo, existe um grande interesse na adoção destas tecnologias por otimizarem todo o processo de produção.

Neste trabalho é feita uma breve descrição das tecnologias mais usadas recentemente, estando elas representadas na Figura 7.

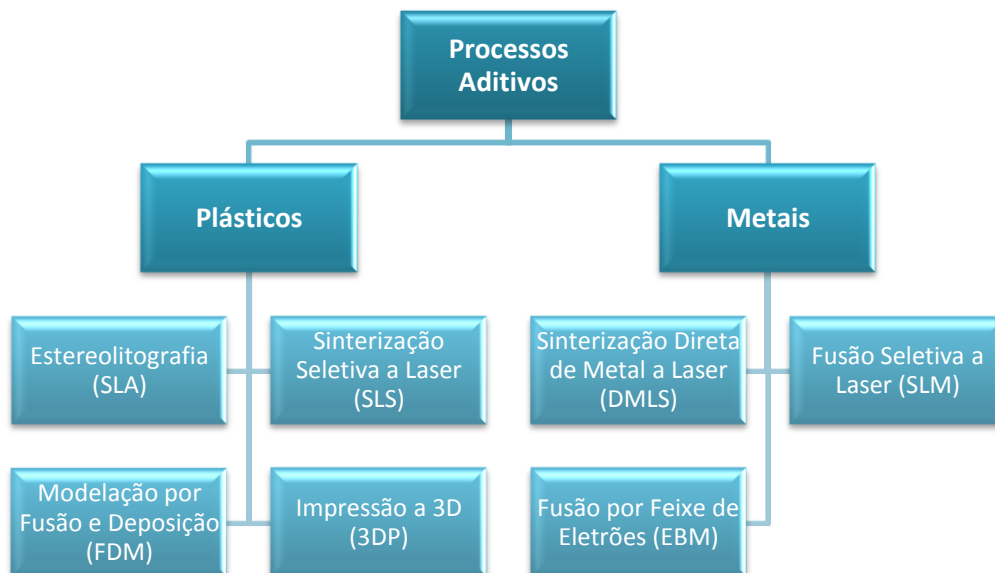


Figura 7. Principais processos aditivos.

Existem diversas formas de classificar estas tecnologias aditivas. Segundo Carvalho e Volpato (2007), essa classificação pode ser feita a partir da forma inicial do material usado:

- Baseado em **líquido**, em que a forma inicial do material está em estado líquido e no final do processo está em forma sólida.
- Baseado em **sólido**, em que todas as formas do material, ao longo do processo, estão em estado sólido.

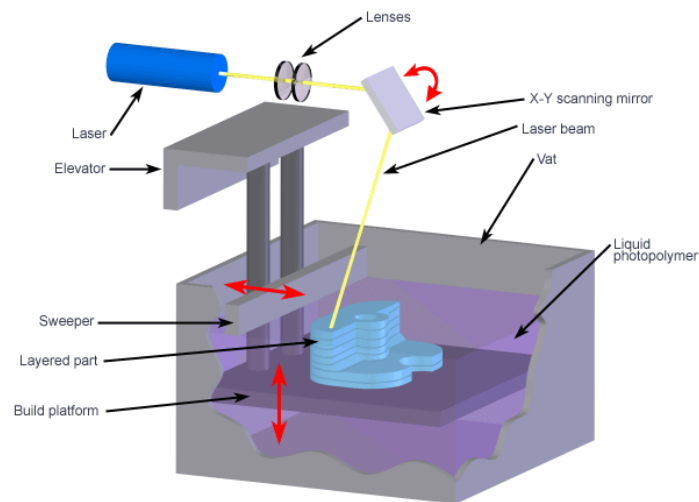
- Baseado em **pó**, em que a forma inicial do material está em pó e no fim do processo está em estado sólido.

Para Pham e Gault (1998), as tecnologias podem ser divididas em aditivas, onde o modelo é construído camada por camada, e em subtrativas onde se dá a remoção do material até dar origem à peça pretendida.

3.1.1. Estereolitografia (SLA – *Stereolithography Apparatus*)

A Estereolitografia foi inventada por Charles W. Hull em 1986 e foi o primeiro processo a entrar no mercado em 1988 (Carvalho e Volpato, 2007).

Esta tecnologia consiste em construir modelos tridimensionais a partir de polímeros líquidos sensíveis à luz, que se solidificam quando expostos à radiação ultravioleta através de um feixe de laser (Gorni, 2001).



Copyright © 2008 CustomPartNet

Figura 8. Princípio de funcionamento do processo SLA.
Fonte: CustomPartNet (2008)

3.1.2. Sinterização Seletiva a Laser (SLS – *Selective Laser Sintering*)

Esta tecnologia foi desenvolvida por Ross Householder em 1979 e comercializada pela primeira vez por Carl Deckard em 1986 (IC Learning Series, 2012; Guo *et al.*, 2011), e faz uso de um raio laser para sinterizar seletivamente, camada a camada, o material em forma de pó (Kruth *et al.*, 2005).

O princípio básico de funcionamento é semelhante ao da tecnologia SLA diferindo apenas no facto de a SLS não necessitar de suportes estruturais pois o material não sinterizado rodeia a peça construída servindo, assim, ele próprio, de suporte.

Este processo destaca-se de todos os outros pelo facto de poder ser usado com qualquer material que se consiga transformar em pó.

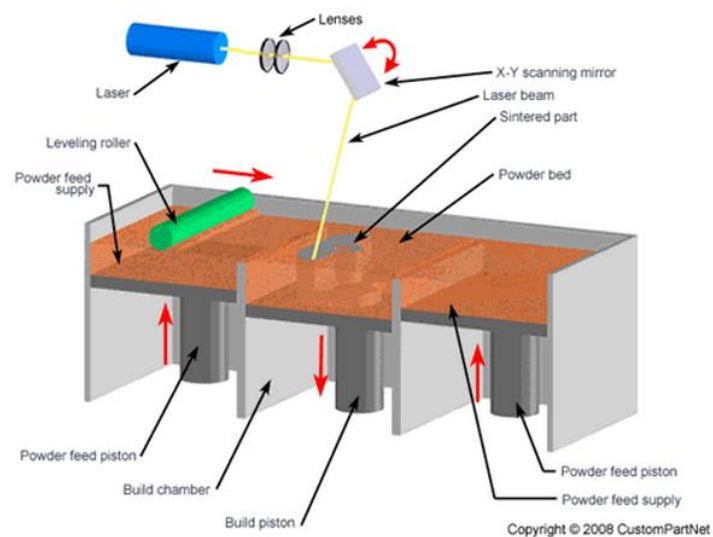


Figura 9. Princípio de funcionamento do processo SLS.

Fonte: CustomPartNet (2008)

3.1.3. Modelação por Fusão e Deposição (FDM – *Fused Deposition Modelling*)

A Modelação por Fusão e Deposição foi inventada por Steven Scott Crump em 1989 e consiste na deposição de um material termoplástico construindo, assim, as peças pretendidas por extrusão do mesmo (IC Learning Series, 2012).

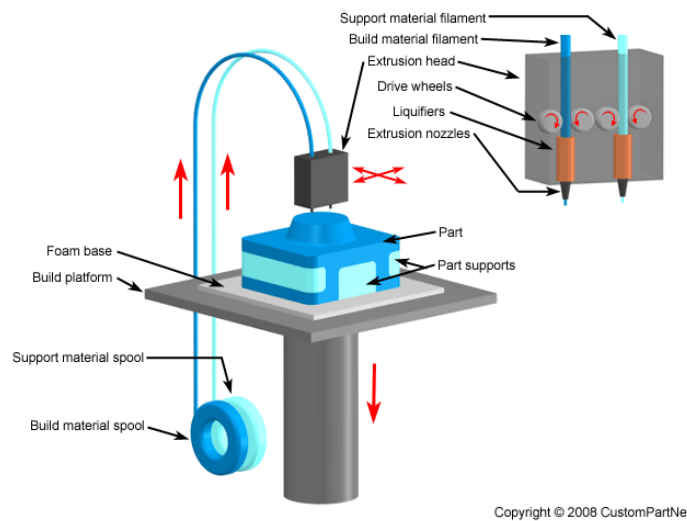


Figura 10. Princípio de funcionamento do processo FDM.
Fonte: CustomPartNet (2008)

3.1.4. Impressão a 3D (3DP – *Three Dimensional Printing*)

A tecnologia de 3DP surgiu no final da década de 1980 e difere das outras no sentido em que não faz uso de um raio laser para processar o material em pó, mas no entanto, é semelhante ao processo SLS, fazendo uso da impressão por jacto de tinta, sendo o material consolidado por um ligante líquido (Junior e Marques, 2013; Carvalho e Volpato, 2007; IC Learning Series, 2012).

Este processo consegue produzir peças diferentes simultaneamente e com diferentes cores (Mancanares *et al.*, 2013).

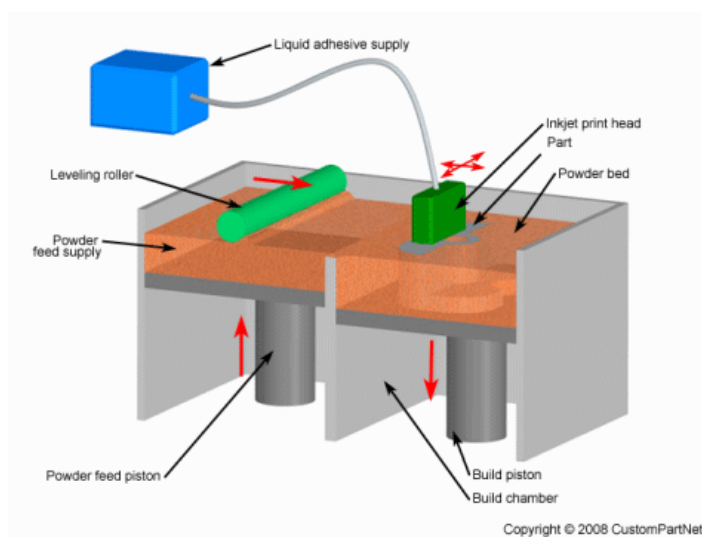


Figura 11. Princípio de funcionamento do processo 3DP.
Fonte: CustomPartNet (2008)

3.1.5. Sinterização Direta de Metal a Laser (DMLS – *Direct Metal Laser Sintering*)

O processo de Sinterização Seletiva a Laser pode ser direto ou indireto, sendo a tecnologia DMLS uma derivada direta da mesma.

Esta tecnologia foi desenvolvida em conjunto pela *Rapid Product Innovations* (RPI) e pela *EOS GmbH* em 1994 sendo o primeiro processo para produzir peças metálicas a ser comercializado (Greskovic e Duleba, 2011). O seu funcionamento é semelhante ao da tecnologia SLS, em que as camadas de pó metálico são fundidas com recurso a um laser, permitindo produzir protótipos e peças em metal (Kruth *et al.*, 2005; Gorni, 2013; Navratil *et al.*, 2011).

A DMLS tem muitas vantagens em relação aos processos subtrativos, principalmente no que diz respeito à velocidade, sendo um processo bastante rápido devido ao facto de não necessitar de qualquer ferramenta especial para o seu funcionamento, conseguindo assim produzir peças em poucas horas.

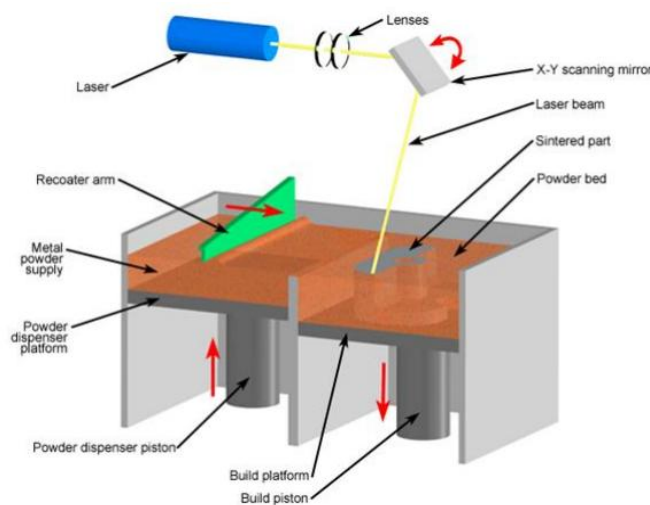


Figura 12. Princípio de funcionamento do processo DMLS.

Fonte: CustomPartNet (2008)

3.1.6. Fusão Seletiva a Laser (SLM – *Selective Laser Melting*)

A SLM é uma tecnologia aditiva desenvolvida pela empresa Renishaw e consiste na produção de peças metálicas densas diretamente de um modelo CAD.

Tal como o processo DMLS, a tecnologia SLM é derivada da Sinterização Seletiva a Laser, em que o material metálico em pó usado durante o processo atinge o seu ponto de fusão, através de um raio laser, e funde-se à camada anterior formando a peça desejada, numa atmosfera controlada.

Este processo foi desenvolvido devido à necessidade de se obter peças e protótipos funcionais e com alta densidade (Campanelli *et al.*, 2007; Gorni, 2013).

Segundo Kumar e Kruth (2008), este processo está cada vez mais a ser usado em vez do processo original SLS, isto por ser melhor em aspetos como a força e a complexidade em relação aos processos subtrativos.

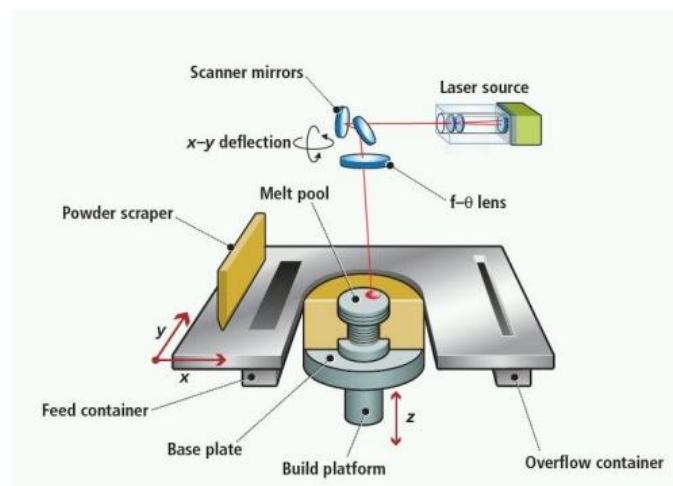


Figura 13. Princípio de funcionamento do processo SLM.

Fonte: CustomPartNet (2008)

3.1.7. Fusão por Feixe de Eletrões (EBM – *Electron Beam Melting*)

A Fusão por Feixe de Eletrões é uma tecnologia recente, desenvolvida pela empresa Arcam AB na Suécia, que consiste na produção de objetos metálicos pela fusão do pó metálico através de um feixe de eletrões e num ambiente de vácuo, permitindo o uso de materiais reativos.

Ao contrário de outras tecnologias, a EBM produz peças metálicas com elevada resistência e completamente densas, sem ser necessário um tratamento térmico depois de produzidas, o que acontece com a SLS e a DMLS.

Esta tecnologia é ideal para baixos volumes de produção e diferencia-se das restantes em relação à eficiência do feixe de eletrões, que tem um menor consumo de energia, quando comparada com a eficiência do laser (Larsson *et al.*, 2003).

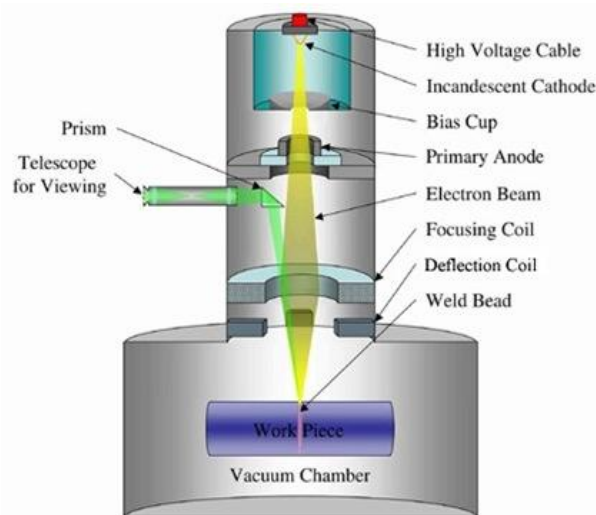


Figura 14. Princípio de funcionamento do processo EBM.

Fonte: CustomPartNet (2008)

3.2. Comparação de Processos

Na Tabela 2 é apresentado um resumo das principais vantagens e desvantagens dos processos aditivos de produção rápida considerados anteriormente neste trabalho.

Tabela 2. Vantagens e desvantagens dos processos de produção rápida.

| | | Vantagens | Desvantagens |
|-----|---------|--|--|
| SLA | LÍQUIDO | <ul style="list-style-type: none"> - Geometrias complexas (Mancanares <i>et al.</i>, 2013); - Boa precisão e melhor acabamento superficial (Mancanares <i>et al.</i>, 2013); - Capacidade de gerar peças ocas (Mancanares <i>et al.</i>, 2013). | <ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de suportes estruturais (Mancanares <i>et al.</i>, 2013); - Necessidade de pós-cura para o acabamento (Mancanares <i>et al.</i>, 2013); - Limitado a polímeros líquidos sensíveis (Mancanares <i>et al.</i>, 2013); - Elevado custo dos materiais e modelos (Lino e Neto, 2000); - Utilização de materiais tóxicos; - Fraca resistência mecânica (Lino e Neto, 2000); |

| | | |
|-------------|--|---|
| SLS | <ul style="list-style-type: none"> - Durabilidade elevada; - Extensa gama de materiais (Mancanares <i>et al.</i>, 2013); - Geometrias complexas (Mancanares <i>et al.</i>, 2013); - Elevada resistência mecânica e térmica (Navratil <i>et al.</i>, 2011); - Customização em massa (Kruth <i>et al.</i>, 2005); - Não necessita de suportes estruturais (Kruth <i>et al.</i>, 2005); - Não necessita de pós-cura (Gaspar, 2006); - Apenas um equipamento pode processar vários tipos de materiais (Carvalho e Volpato, 2007); - Processo mais rápido que a SLA e FDM (Lino e Neto, 2000); | <ul style="list-style-type: none"> - Elevado consumo energético (Navratil <i>et al.</i>, 2011); - Fraco acabamento superficial (Navratil <i>et al.</i>, 2011); - Distorções e empenos (Navratil <i>et al.</i>, 2011); - Alta porosidade e rugosidade (Navratil <i>et al.</i>, 2011; Lino e Neto, 2000); - Possibilidade de emissão de gases tóxicos que devem ser removidos (Navratil <i>et al.</i>, 2011); - Elevado custo das matérias-primas e de equipamento (Lino e Neto, 2000); - Precisão dimensional inferior à SLA (Lino e Neto, 2000); |
| EBM | <ul style="list-style-type: none"> - Elevada resistência térmica e mecânica; - Processo rápido; - Elevadas taxas de deposição; - Boa precisão; - Menor consumo de energia (Larsson <i>et al.</i>, 2003); - Menores custos de produção e manutenção (Larsson <i>et al.</i>, 2003); - Vácuo elimina impurezas (Larsson <i>et al.</i>, 2003); | <ul style="list-style-type: none"> - Limitação nos materiais; - Necessita de vácuo; - Custo elevado do equipamento; |
| 3DP | <ul style="list-style-type: none"> - Alta gama de materiais (Mancanares <i>et al.</i>, 2013); - Processo rápido (Junior e Marques, 2013); - Baixo custo de material (Gaspar, 2006); - Geometrias complexas (Junior e Marques, 2013); - Maior precisão e qualidade em produtos finais (Junior e Marques, 2013); | <ul style="list-style-type: none"> - Fraco acabamento superficial (Mancanares <i>et al.</i>, 2013); - Baixa resistência das peças (Mancanares <i>et al.</i>, 2013); - Reduzida dimensão das peças (Gaspar, 2006); |
| DMLS | <ul style="list-style-type: none"> - Geometrias complexas (Bertol, 2008); - Durabilidade elevada (Vasconcelos <i>et al.</i>, 2001); - Reciclagem de 98% do pó não usado (Navratil <i>et al.</i>, 2011); | <ul style="list-style-type: none"> - Alta porosidade (Navratil <i>et al.</i>, 2011); - Elevado custo de aquisição (Navratil <i>et al.</i>, 2011); - Espaço de trabalho limitado (Navratil <i>et al.</i>, 2011); - Necessidade de polimento (Vasconcelos <i>et al.</i>, 2001); |
| SLM | <ul style="list-style-type: none"> - Consegue uma densidade de quase 100% (Campanelli <i>et al.</i>, 2010); - Não precisa de acabamento superficial (Campanelli <i>et al.</i>, 2010); | <ul style="list-style-type: none"> - Processo com elevado custo (Campanelli <i>et al.</i>, 2010); - Processo lento (Campanelli <i>et al.</i>, 2010); |

| | | | |
|------------|---------------|---|--|
| FDM | SÓLIDO | <ul style="list-style-type: none">- Baixo custo do material (Mancanares <i>et al.</i>, 2013);- Facilidade de operação das máquinas (Mancanares <i>et al.</i>, 2013);- Não há contacto com materiais tóxicos ou lasers;- Equipamento fácil de montar;- Propriedades mecânicas mais elevadas para termoplásticos (Lino e Neto, 2000); | <ul style="list-style-type: none">- Necessidade de suportes estruturais;- Processo lento (Mancanares <i>et al.</i>, 2013; Greskovic e Duleba, 2011);- Fraco acabamento superficial;- Fraca precisão (Mancanares <i>et al.</i>, 2013);- Elevado custo de equipamento (Lino e Neto, 2000); |
|------------|---------------|---|--|

3.3. Análise SWOT da Produção Rápida

Com o objetivo de identificar e analisar os pontos fortes (*Strengths*) e fracos (*Weaknesses*) da produção rápida, tal como as oportunidades (*Opportunities*) e as ameaças (*Threats*) às quais está exposta, apresenta-se neste subcapítulo uma análise SWOT. Sendo esta uma ferramenta importante de gestão, que gera uma visão completa, é fundamental permitindo, assim, um melhor conhecimento da produção rápida.

Tabela 3. Análise SWOT da produção rápida.
Fonte: Adaptado de SASAM (2014)



Após se observar de forma mais transparente os pontos fortes e fracos da produção rápida, pode-se afirmar que esta revela um grande potencial, sendo uma forte concorrente das tecnologias subtrativas, principalmente para pequenos e médios volumes de produção, pois apresenta características que, por vezes, estas últimas são incapazes de adquirir.

3.4. Impacto da Produção Rápida na Customização em Massa

A customização em massa, segundo White e Lynskey (2013), é “a capacidade de criar produtos individualizados, ou pessoalmente personalizados, sem aumentar o custo ou o tempo de produção.”

Segundo Tuck *et al.* (2008), o facto de a produção rápida não fazer uso de ferramentas para a produção de um produto permite o interesse no conceito de customização em massa.

Os clientes procuram, hoje, produtos que completem as suas necessidades a um preço acessível e de forma mais rápida e, como tal, as empresas têm de saber responder aos pedidos individuais desses clientes, de forma a manterem a competitividade no mercado.

Hopkinson e Dickens (2003), através do modelo proposto pelos mesmos, consideram que quanto menor o volume de produção, mais eficiente se torna o processo de produção rápida, contrariamente aos processos subtrativos, onde se verifica um aumento dos custos com a diminuição do volume de produção. Desta forma, a produção rápida tem um potencial impacto na customização em massa devido à capacidade de produzir peças complexas através de um modelo digital feito pelo cliente, ou com o cliente, satisfazendo assim as suas necessidades (Tuck e Hague, 2006).

3.5. Impacto da Produção Rápida na Cadeia de Abastecimento

A cadeia de abastecimento foca-se no armazenamento, transporte e distribuição quer de matérias-primas quer de produtos acabados. A produção rápida tem impacto neste conceito no sentido em que consegue eliminar desperdícios em qualquer um desses aspetos, isto porque faz uso de modelos tridimensionais em CAD e produz a peça diretamente desse modelo, eliminando algumas etapas do processo de produção, ao contrário dos processos subtrativos onde são necessárias todas essas etapas (White e Lynskey, 2013).

Segundo White e Lynskey (2013), existem dois tipos de cadeia de abastecimento: a cadeia de abastecimento ágil e a cadeia de abastecimento “*lean*”.

O princípio básico da **cadeia de abastecimento ágil** consiste na capacidade de responder à mudança, quer seja a nível do volume ou do produto e, para tal, não só é necessária uma resposta rápida a essa mudança como também é necessário haver um certo nível de flexibilidade. A produção rápida tem impacto neste tipo de cadeia no sentido em que consegue produzir um produto/peça imediatamente após o modelo CAD da mesma estar concluído e em baixos volumes de produção (até mesmo de uma unidade), enquanto os processos subtrativos não são económicos nesse aspeto, tornando a cadeia de abastecimento muito menos ágil na resposta ao mercado (White e Lynskey, 2013).

O princípio básico da **cadeia de abastecimento “*lean*”** é reduzir o desperdício, ao longo da mesma, quer de material, custos ou tempos de produção. A produção rápida, como não faz uso de ferramentas para a produção de um objeto, reduz significativamente o custo de produção que, conseqüentemente, reduz o desperdício de custos. Ao fazer uso de um único equipamento para produzir uma larga variedade de produtos reduz o desperdício em relação ao espaço, e como não há desperdício de material durante o processo de produção rápida, por se fazer a reciclagem do mesmo, reduz ainda esse desperdício. Outro aspeto em que a produção rápida tem impacto na sua redução é o armazenamento, pois o único material que é necessário armazenar, ao longo do processo produtivo, é a matéria-prima. Desta forma, a produção rápida tem impacto neste tipo de cadeia de abastecimento, minimizando o custo de produção de um produto (White e Lynskey, 2013).

Segundo Christopher (2000), e como ilustrado na Figura 15, estamos perante uma cadeia de abastecimento ágil quando na presença de um ambiente imprevisível onde se requer uma acentuada variedade de produtos, e perante uma cadeia de abastecimento “*lean*” quando se requer um alto volume de produção, mas com baixa variedade de produtos, e num ambiente considerado previsível.

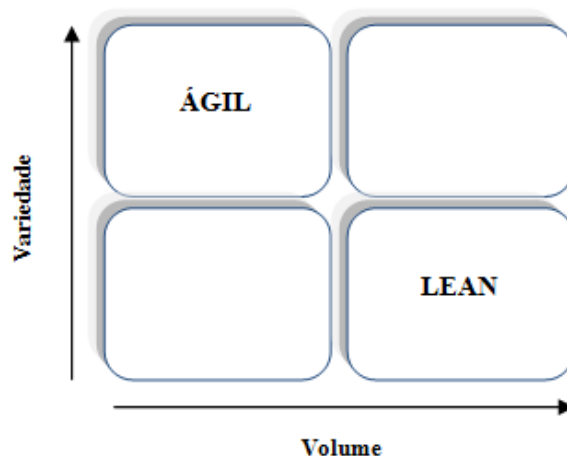


Figura 15. Comparação ente cadeia de abastecimento ágil e “lean”.
Fonte: Christopher (2000)

3.6. Impacto da Produção Rápida nas Competências dos Operários

Apesar dos processos de produção rápida serem praticamente automáticos, estes englobam algumas tarefas onde é necessária a intervenção humana para preparar e monitorizar o equipamento e realizar outras operações diversas.

Estas tarefas, no entanto, requerem uma qualificação técnica por parte dos operadores pois podem influenciar o resultado final da peça a produzir (Relvas, 2002).

Segundo Ruffo *et al.* (2006), o contínuo aumento da automação e a diminuição do trabalho manual nestes processos de produção rápida alteram o custo final da peça.

4. ANÁLISE DE CUSTOS

Neste capítulo é apresentado um modelo de custos, relativo a técnicas de produção rápida, especificamente a técnica de SLM, que permite estimar o custo final por peça. O caso em estudo é a produção de provetes metálicos e de reduzidas dimensões, para a realização de ensaios de tração com o objetivo de se compreender melhor a utilização destas tecnologias aditivas (ver anexo A).

A análise a este modelo inclui vários elementos de custo e tem como principal objetivo demonstrar que esta técnica de produção rápida pode ser economicamente vantajosa e mais eficiente que as técnicas subtrativas existentes no mercado.

4.1. Descrição do Modelo de Custos

A técnica aditiva de SLM permite a produção de mais de uma peça ao mesmo tempo tal como a produção de peças diferentes devido à ausência de ferramentas ao longo do processo.

Esta técnica é ideal para peças metálicas de forma complexa, uma vez que proporciona uma alta qualidade, altas propriedades mecânicas e um bom acabamento superficial, podendo contudo ser necessário um pós-processamento da peça para um acabamento superficial de excelência, o que requer processos subtrativos.

Sendo este um processo praticamente automático existe uma diminuição do trabalho manual, pelo que o custo de mão-de-obra é considerado nas atividades em que é necessário um operário para monitorizar a máquina e realizar outras tarefas.

Para a produção destes provetes de ensaio foi utilizada a máquina *Laser Beam Melting System SLM 125 HL* pois é uma máquina económica, e ideal para este caso de estudo, capaz de produzir componentes metálicos complexos e em pequenos lotes.



Figura 16. Laser Beam Melting System SLM 125 HL.

Tabela 4. Principais características da máquina Laser Beam Melting System SLM 125 HL.

| Características da Máquina | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| Dimensões da Máquina | 1350 x 1900 (2400) x 800 mm |
| Dimensões da Plataforma | 125 x 125 x 75 mm |
| Potência do Laser | 100/200 W |
| Velocidade de Digitalização | 20 m/s |
| Peso da Máquina | 700 kg |
| Consumo de Energia | 4 Kwh |

Para a execução deste modelo foram estudados e analisados cinco modelos de custos encontrados na literatura. Na Tabela 5 são apresentadas as categorias de custos consideradas por cada autor.

Tabela 5. Diferentes categorias de custos propostas pelos autores dos modelos.

| Categorias de Custos | | | | | | | | |
|------------------------------|---------|----------------------|----------|----------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|-----------|
| | Máquina | Trabalho de Produção | Material | Despesas Gerais - Produção | Despesas Gerais - Administração | Pré-Processamento | Pós-Processamento | Qualidade |
| Hopkinson & Dickens (2003) | X | X | X | | | | | |
| Ruffo <i>et al.</i> (2006) | X | X | X | X | X | | | |
| Atzeni & Salmi (2012) | X | | X | | | X | X | |
| Baumers <i>et al.</i> (2012) | X | X | | X | X | | | |
| Schmid & Levy (2012) | | | | | | | | X |

De forma a se fazer uma comparação entre os diferentes modelos, foi elaborada uma tabela onde são expostas as principais características dos mesmos.

Tabela 6. Principais características dos modelos analisados.

| | Técnica de Estimativa de Custos | Volume de Produção | % Utilização da Máquina | Tamanho das Peças | Tipo de Material | Reciclagem | Casos de Estudo |
|----------------------------|---|--------------------|-------------------------|----------------------------------|------------------|------------|---|
| Hopkinson & Dickens (2003) | Modelo Paramétrico | Grande | 90 % (EOSP360) | Pequenas (35mm) + Médias (210mm) | Plástico (LS) | Não | 1 – Peça Pequena (35mm): “Lever” 2 – Peça Média (210mm): “Cover” |
| Ruffo <i>et al.</i> (2006) | Modelo Paramétrico + Abordagens de Engenharia | Pequeno e Grande | 57 % (LS Vanguard) | Pequenas (35mm) | Plástico (LS) | Sim (50%) | Peça Pequena (35mm): “Lever” |

| | | | | | | | |
|----------------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|-------------------|------------------------|-----|--|
| Atzeni & Salmi (2012) | Modelo Paramétrico | Pequeno | 60% (EOSINT M270) | Pequenas e Médias | Metal (SLS) | Não | Aeronáutica: componentes de trem de aterragem |
| Baumers et al. (2012) | Modelo Paramétrico (ABC) | Pequeno e Médio | 57,04 % (EOSINT M270) | Pequenas e Médias | Metal (DMLS) | Não | 1 – “ <i>Bearing Block</i> ” 2 – “ <i>Turbine Wheel</i> ” 3 – “ <i>Belt Link</i> ” 4 – “ <i>End Cap</i> ” 5 – “ <i>Venturi</i> ” |
| Schmid & Levy (2012) | Modelo Paramétrico | - | - | - | Metal e Plástico (SLS) | Não | - |

Na Tabela 7 são apresentados os pressupostos dos quais os autores partiram para a realização de cada modelo de custos.

Tabela 7. Pressupostos dos modelos considerados por cada autor.

| Pressupostos do Modelo | |
|---------------------------------------|---|
| Hopkinson & Dickens (2003) | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Tempo de depreciação da máquina – 8 anos; ➤ Peças todas iguais; ➤ Tempo de produção constante; ➤ Propriedades do material, acabamento superficial e precisão das peças não são considerados um problema; ➤ Usada a taxa mais alta do custo de manutenção; ➤ Custos com consumo de energia da máquina, espaço, <i>design</i> e testes não são considerados. |
| Ruffo et al. (2006) | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Tempo de <i>set-up</i>, de limpeza, de aquecimento e de arrefecimento devem ser considerados custos fixos para cada nova produção de peça; ➤ Reciclagem do material não sinterizado – 50%; ➤ Custo do consumo de energia da máquina não é considerado. |
| Atzeni & Salmi (2012) | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Peças todas iguais; ➤ Custo de produção considerado constante para grandes volumes; ➤ Custos de energia, espaço e equipamentos auxiliares não são considerados; ➤ Custo do operador (por hora) relativo à Europa Ocidental. |
| | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Consumo de energia da máquina é considerado; |

| | |
|---|--|
| Baumers <i>et al.</i> (2012) | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Várias peças diferentes numa só produção e em diversas quantidades. |
| Schmid & Levy (2012) | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Custos de qualidade considerados; ➤ Custo de acabamento de cada peça considerado; ➤ Aspectos relacionados com o equipamento são da responsabilidade do produtor; ➤ Modelo construído para 3 opções diferentes: uma máquina completamente carregada, uma máquina carregada pela metade e 2 ou 4 máquinas completamente carregadas. |

No modelo apresentado neste trabalho, e com base na análise dos modelos encontrados na literatura, foram considerados três categorias sendo elas referentes aos custos de processamento, de material e de energia.

Um pressuposto importante relativo à produtividade das máquinas por ano foi considerado, sendo que Hopkinson e Dickens (2003) assumiram que a máquina trabalha 7884 horas por ano, dando uma utilização de 90% enquanto que Ruffo *et al.* (2006), Atzeni e Salmi (2012) e Baumers *et al.* (2012) assumiram uma utilização de cerca de 60%, dando 5000 horas de operação por ano. Neste presente trabalho, e relativamente a este mesmo pressuposto, foram consideradas quatro situações, sendo elas:

- A máquina trabalha 8 horas por dia durante 50 semanas, caso se pretenda uma produção contínua, ou seja, 2000 horas por ano;
- A máquina trabalha 6 horas por dia durante 50 semanas, ou seja, 1500 horas por ano;
- A máquina trabalha 4 horas por dia durante 50 semanas, ou seja, 1000 horas por ano;
- A máquina trabalha 2 horas por dia durante 50 semanas, ou seja, 500 horas por ano, sendo esta a situação mais realista neste trabalho pois atualmente a produção está a ser efetuada simplesmente para realização de ensaios de tração, e em reduzido número, pelo que não se justifica a máquina operar durante mais tempo.

Para além do pressuposto anterior foram ainda considerados, para este modelo de custos, os seguintes pressupostos:

- As **partes a produzir** são todas iguais;
- O custo com o **consumo de energia** é considerado devido à sua importância sobre o custo final, sendo usado o consumo típico da máquina escolhida para este caso, ou seja, 4 Kwh;
- A **reciclagem do material** não sinterizado é considerada, aproveitando-se 90% do material;
- O **tempo de set-up** pode variar entre 0,5 horas se não houver mudança de material e se só se considerar a limpeza do equipamento e 2,5 horas se considerarmos a mudança do material mais a limpeza do equipamento de modo a evitar a contaminação pelo material anterior;
- O **tempo de pós-processamento** varia entre duas situações sendo elas: não se considera o pós-processamento, sendo esta a situação realista neste caso de estudo, ou considera-se o tempo de fresagem da parte produzida, porém num intervalo de tempo curto;
- O custo de **depreciação da máquina** foi estimado para 42.500€ por ano, com base no modelo de Hopkinson e Dickens (2003);

Após estabelecidos os pressupostos essenciais, para a elaboração do modelo de custos, foram desenvolvidos os cálculos necessários para o cumprimento do objetivo deste trabalho recorrendo a uma série de equações apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8. Equações usadas para o cálculo do preço de cada unidade.

Equações do Modelo de Custos

| | |
|--|--|
| Custo de Energia | $(\text{Energia Usada} \times \text{Custo da Energia}) / (\text{Número Total de Unidades})$ |
| Massa de Material por Unidade | $(\text{Densidade do Material Sinterizado} \times 1,1 \times \text{Volume de cada Unidade})$ |
| Custo do Material | $(\text{Massa do Material} \times \text{Custo do Material})$ |
| Custo da Máquina por Hora | $(\text{Custo de Depreciação} / \text{Horas por Ano})$ |
| Custo da Máquina por Construção | $(\text{Custo da Máquina por Hora} \times \text{Tempo de Produção})$ |
| Custo de Pré-Processamento | $(\text{Custo do Operador}) \times (\text{Tempo de Set-Up} / \text{Número Total de Unidades})$ |
| Custo de Pós-Processamento | $(\text{Custo do Operador} \times \text{Tempo de Pós-Processamento}) / (\text{Número Total de Unidades})$ |
| Custo de Processamento | $(\text{Custo de Pré-Processamento}) + (\text{Custo da Máquina por Construção} / \text{Número Total de Unidades}) + (\text{Custo de Pós-Processamento})$ |

4.1.1. Custo de Processamento

Tendo como objetivo determinar o custo de processamento por unidade produzida há que ter em conta diversos fatores, incluídos nesta categoria de custo, tais como o custo de mão-de-obra e o custo da máquina. Na Tabela 9 são apresentadas os parâmetros necessários, e respetivos valores, para o cálculo do custo de processamento dado pela soma de três partes, sendo elas: o custo de pré-processamento, o custo do processamento em si e o custo do pós-processamento, se for uma tarefa necessária.

Tabela 9. Cálculo do custo de processamento por unidade produzida.

| Descrição | Valor Estimado |
|--|-----------------------------|
| Custo do operador | 7,5 €/hora |
| Tempo de <i>set-up</i> | 0,5h ou 2,5h |
| Número de unidades (por construção) | 6 |
| Custo de depreciação da máquina | 42.500 €/ano |
| Horas por ano | 2000h; 1500h; 1000h ou 500h |
| Tempo de produção (por construção) | 1,5h |
| Tempo de pós-processamento | 0h; 0,5h ou 1h |

O custo da máquina é obtido tendo em conta o custo de depreciação por ano, as horas por ano em que está em funcionamento e o custo da manutenção por ano. Como no modelo apresentado o custo da máquina é dado por unidade produzida, o custo da manutenção por ano não é considerado neste cálculo.

4.1.2. Custo de Material

O método para calcular o custo do material usado na produção de provetes tem em conta o material sinterizado e o material não sinterizado. Sabendo que, neste trabalho, é considerada a reciclagem de 90% do material não sinterizado, é necessário ter em conta o fator de desperdício para que se efetue, de forma correta, o cálculo da massa do material não sinterizado por construção. Desta forma, o custo do material engloba um fator de

desperdício de material de 1,1. Na Tabela 10 são apresentados os parâmetros necessários para o cálculo do custo de material por unidade produzida.

Tabela 10. Cálculo do custo de material por unidade produzida.

| Descrição | Valor Estimado |
|--|--------------------------|
| Densidade de material sinterizado | 7,9 g/cm ³ |
| Volume de cada unidade | 0,236318 cm ³ |
| Custo do material | 123 €/kg |

4.1.3. Custo do Consumo de Energia

Dado que as tecnologias aditivas são praticamente automáticas é relevante considerar o consumo de energia do equipamento durante a produção dos componentes a estudar. Desta forma, e para efeitos de cálculo, foi estimado um custo de energia por Kwh e foi considerado que a máquina usada tem um consumo de 4 Kwh. Sendo assim, na Tabela 11 estão apresentados os parâmetros usados para o cálculo do consumo de energia por unidade produzida.

Tabela 11. Cálculo do custo do consumo de energia por unidade produzida.

| Descrição | Valor Estimado |
|---------------------------------|----------------|
| Energia usada | 4 Kwh |
| Custo da energia usada | 0,1133 €/Kwh |
| Número total de unidades | 6 |

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Após o modelo de custos, produzido para o caso de estudo exposto neste trabalho, estar concluído procedeu-se à análise dos seus resultados, tornando-se possível analisar quais os parâmetros com mais impacto.

Desta forma, podemos observar na Figura 17 que a categoria de custos com mais peso sobre o custo final da unidade refere-se ao custo do processamento. Relativamente ao custo de material por quilograma, ainda é um custo alto, isto porque o material metálico existente no mercado ainda é relativamente dispendioso, contudo, com a maior adoção destas tecnologias aditivas no futuro, eventualmente o preço relativo ao material irá ser reduzido refletindo-se, conseqüentemente, no custo por unidade.

Em relação ao custo de energia para este caso de estudo, este apresenta-se muito reduzido. Contudo, é um custo que deve ser tido em conta em outras situações de estudo pois terá um maior efeito no custo final quanto mais unidades forem produzidas.

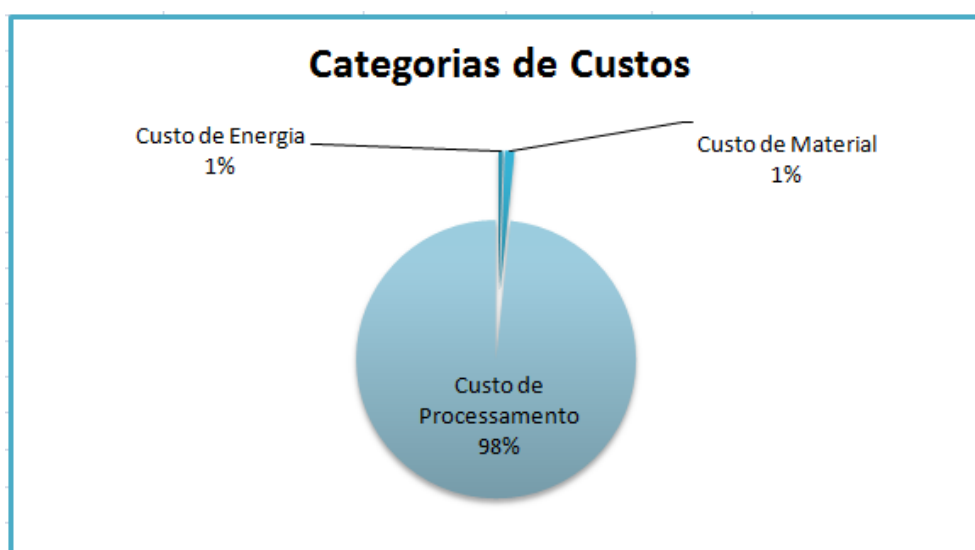


Figura 17. Categorias de custos presentes no modelo.

Tal como anteriormente neste trabalho foi descrito, foi analisada a sensibilidade do modelo perante os seguintes parâmetros: tempo de pós-processamento, tempo de *set-up* e número de horas por ano.

Em relação ao número de horas de produção por ano, podemos verificar na Figura 18 que existe uma diminuição do custo por unidade conforme o número de horas aumenta. Sendo que, no caso de estudo apresentado o objetivo é apenas componentes para ensaios de tração, não se justifica um número de horas de produção por ano elevado o que provoca um aumento no custo por componente produzido, tornando-se um inconveniente para a situação a estudar.

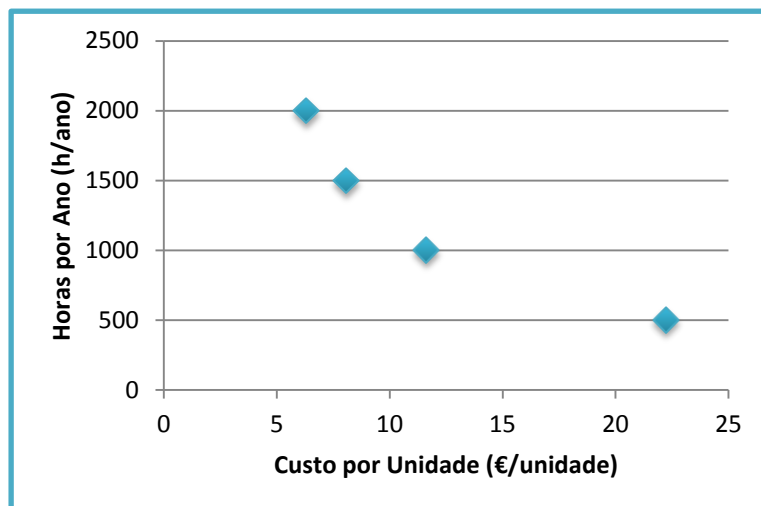


Figura 18. Sensibilidade do modelo em relação às horas por ano.

Relativamente ao tempo de *set-up*, foram consideradas duas situações distintas: a primeira, com duração de 0,5 horas, onde a mudança do material não era necessária ocorrendo simplesmente as tarefas de limpeza do equipamento, e a segunda situação, em que se recorria à mudança de material e conseqüente limpeza do equipamento para evitar contaminações pelo material anterior, com duração de 2,5 horas. Desta forma, foi analisada a sensibilidade do modelo perante este parâmetro podendo-se observar, na Figura 19, um ligeiro aumento no custo por unidade produzida.

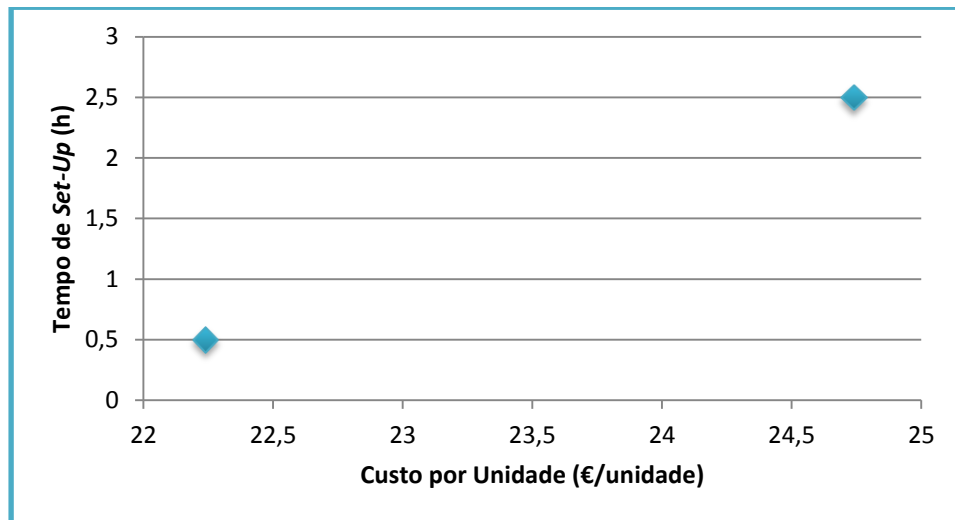


Figura 19. Sensibilidade do modelo em relação ao tempo de *set-up*.

Com a mesma linha de pensamento foram analisadas três situações referentes ao tempo de pós-processamento, sendo elas: a primeira, e sendo esta a situação real do caso em estudo, em que não se considera necessário o pós-processamento; a segunda situação e terceira, em que se considera uma tarefa de fresagem com duração de meia hora e uma hora, respetivamente. Na Figura 20 são apresentados os resultados da análise a este parâmetro, onde se observa uma pequena sensibilidade do modelo em relação ao mesmo.

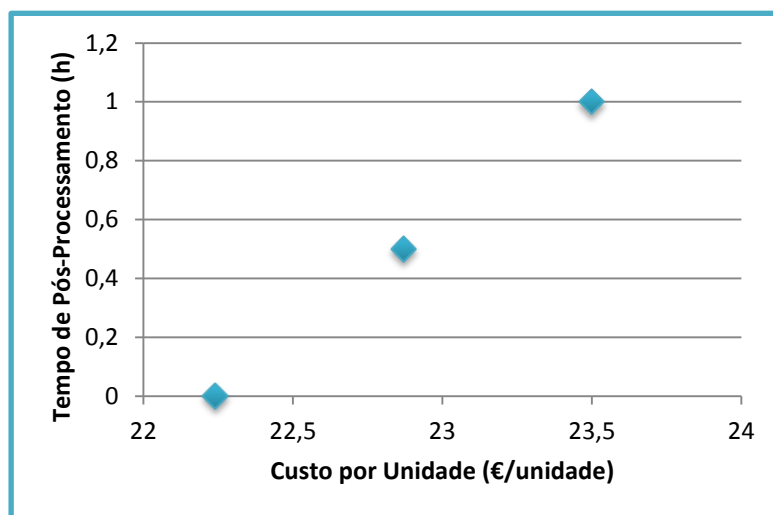


Figura 20. Sensibilidade do modelo em relação ao tempo de pós-processamento.

Foi ainda analisada uma última condição referente ao número total de unidades produzidas por construção. No presente caso de estudo foram consideradas 6 unidades produzidas por construção, contudo, este é um parâmetro sensível neste modelo pois consoante a posição dos componentes podemos obter, ou não, melhores resultados. Esta é uma situação a estudar com tempo, e com resultados concretos, pois pode diminuir consideravelmente o custo por unidade, principalmente se houver a possibilidade de as peças serem produzidas verticalmente, tornando o arranjo das mesmas na plataforma muito mais eficiente. Na Figura 21 podemos observar, considerando o caso de 500 horas por ano, uma considerável diminuição do custo por unidade na possibilidade da produção de 50 componentes por construção.

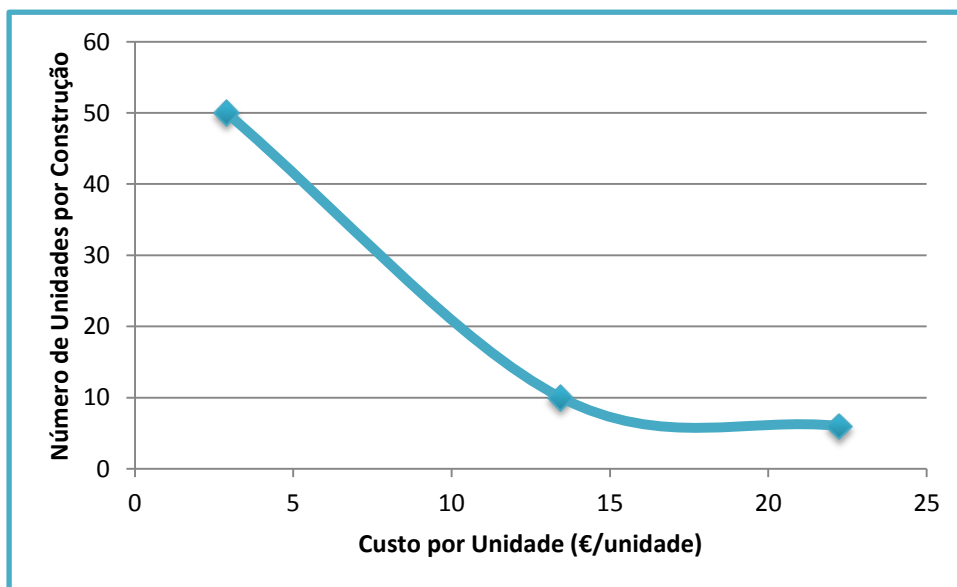


Figura 21. Sensibilidade do modelo em relação ao número de unidades por construção.

6. CONCLUSÕES

De forma a manter a competitividade, as empresas têm de conseguir satisfazer os clientes em aspetos como a alta qualidade do produto, menores tempos da entrega do mesmo e custos razoáveis, apostando assim na diferenciação e na especificação do produto. Desta forma, a produção rápida tornou-se uma ferramenta competitiva para as empresas pois reduz tanto o tempo do desenvolvimento do produto por não necessitar de ferramentas, otimizando toda a sua produção, assim como os seus custos.

Para estimar o custo de cada componente produzido por técnicas de produção rápida, foi desenvolvido, neste trabalho, um modelo de custos. Este modelo apresentado foi baseado em vários modelos de custos encontrados na literatura e foi testado com dados referentes à produção de provetes para ensaios de tração.

As maiores limitações da produção rápida são o investimento necessário para o equipamento, e conseqüente manutenção, e o custo do material. Contudo, vão havendo novos desenvolvimentos em relação a estas duas limitações reduzindo o preço das mesmas, o que eventualmente irá tornar a produção rápida um processo competitivo com os processos subtrativos.

Com o modelo exposto e tendo em conta diferentes situações, obteve-se um preço acessível para cada componente produzida. Apesar de ser ainda um processo lento e tendo a repetibilidade como grande barreira, estas técnicas aditivas podem ser economicamente convenientes e competitivas com as subtrativas para pequenas e médias produções.

6.1. Futuros Desenvolvimentos

O modelo apresentado neste trabalho é baseado em vários modelos encontrados na literatura, sendo que os casos de estudo analisados diferem do problema analisado neste trabalho, nomeadamente em relação à dimensão da peça produzida e à dimensão das séries. Desta forma, estes aspetos poderão levar a que o modelo proposto não seja perfeito para o caso estudado.

No futuro deverão ser melhor analisadas questões como:

- a reciclagem do material não sinterizado, pois numa segunda produção os custos podem ser reduzidos consideravelmente;
- o custo de investimento dos equipamentos que será elevado, e não foi considerado neste modelo, mas que eventualmente para uma produção contínua se irá pagar a si próprio;
- o custo de manutenção dos equipamentos, para o caso de no futuro se pretender a produção contínua e de uma maior série de peças, que neste trabalho não foi considerado por não se justificar o mesmo perante o reduzido número de componentes produzidos;
- a posição em que as peças se devem ajustar na plataforma de forma a tornar o processo mais eficiente.

Atualmente existem diversas técnicas usadas para estimar custos, sendo que as principais são as técnicas baseadas em analogia, os modelos paramétricos no qual tem base o modelo desenvolvido, as abordagens de engenharia e as redes neuronais. Desta forma, seria essencial abordar este mesmo problema recorrendo a todas estas técnicas para uma comparação das mesmas.

Quando o modelo estiver apto a englobar todas estas considerações, o passo seguinte será comparar os custos das técnicas de produção rápida com os custos das tecnologias subtrativas e analisar em que situações as técnicas aditivas se tornam competitivas e economicamente convenientes.

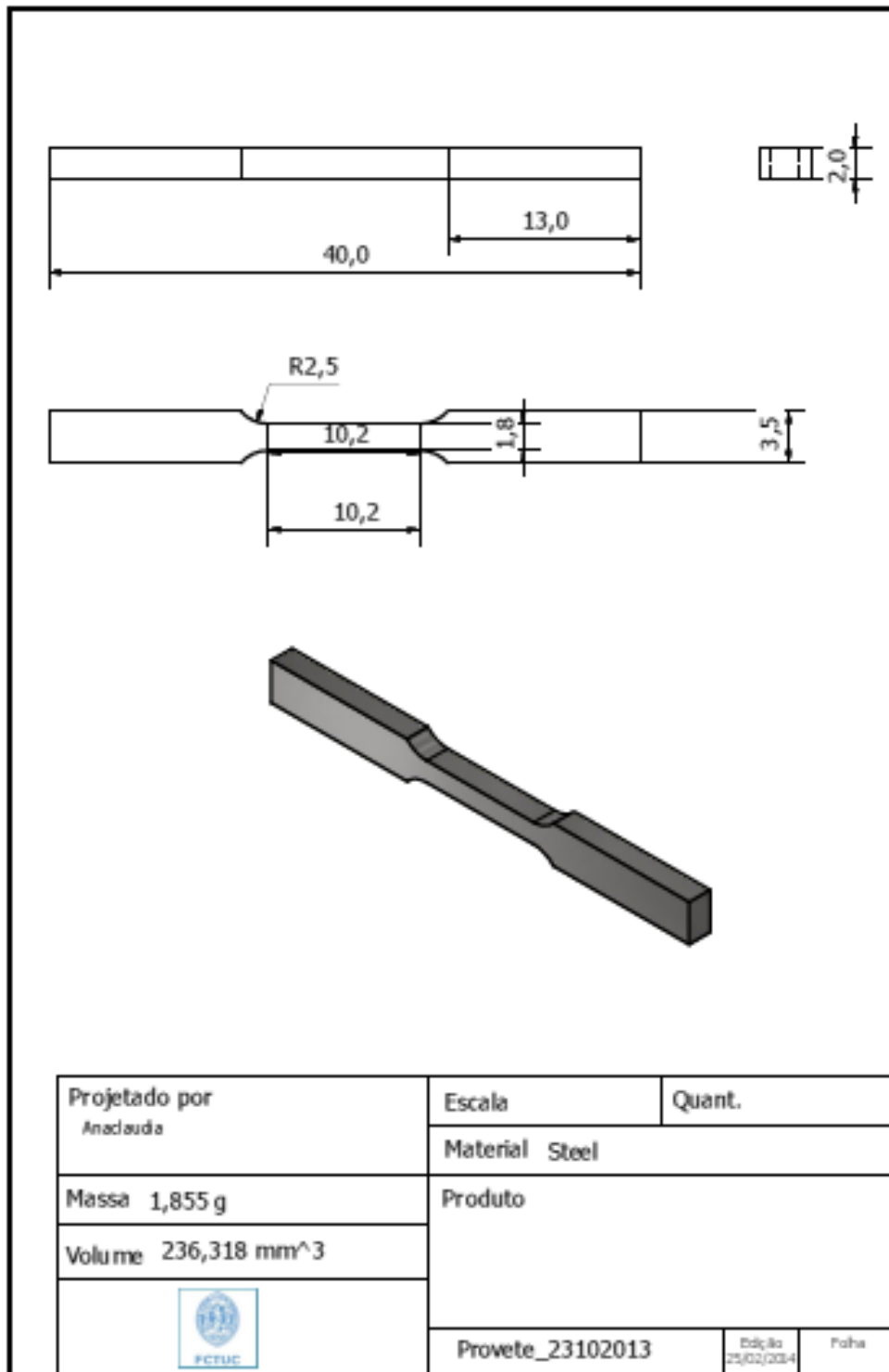
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- IC Learning Series (2012), “IC Learning Series: Rapid Prototyping & Manufacturing Technologies.” The Hong Kong Polytechnic University Industrial Centre.
- Bertol, L.S. (2008), “Contribuição ao Estudo da Prototipagem Rápida, Digitalização Tridimensional e Seleção de Materiais no Design de Implantes Personalizados.” Tese de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Bessa, J.S. (2006) “Prototipagem Rápida e Engenharia do Produto.” Faculdade Pitágoras. Acedido em 28 de Março de 2014. Disponível em: <<http://amigonerd.net/exatas/engenharia/prototipagem-rapida>>.
- Bineli, A., Peres, A., Jardini, A. e Filho, R. (2011), “Direct Metal Laser Sintering (DMLS): Technology for Design and Construction of Microreactors.” 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. 11 a 15 de Abril de 2011. Caxias do Sul, Brasil.
- Campanelli, S.L., Contuzzi, N., Angelastro, A. e Ludovico, A. (2010) “Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting Process.” Polytechnic of Bari, Department of Management and Mechanical Engineering, Viale Japigia, 182.
- Carvalho, J. e Volpato, N. (2007), “Prototipagem Rápida: Tecnologias e aplicações.” São Paulo: Edgar Blücher.
- Christopher, M. (2000), “The Agile Supply Chain: Competing in Volatile Markets.” *Industrial Marketing Management*, 29, pp. 37-44.
- CustomPartNet (2008), www.custompartnet.com. Acedido em 1 de Abril de 2014.
- Gaspar, J.M.B. (2006), “Estudo da Cura e do Comportamento Reológico de Sistemas Poliméricos Altamente Reforçados em Estereolitografia.” Tese de Mestrado em Engenharia de Polímeros. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Minho.
- Gorni, A.A. (2001), “Introdução à Prototipagem Rápida e seus Processos.” *Revista Plástico Industrial*, Vol. 3, n. 31, pp. 230-239.
- Gorni, A.A. (2013), “Prototipagem Rápida, a Revolução 3D.” *Revista Plástico Industrial*, Novembro 2013.
- Greskovic, F. e Duleba, B. (2011), “DMLS – Method of Direct Manufacturing of Prototypes and Tools.” The 14th International Scientific Conference, Trends and Innovative Approaches in Business Processes.
- Guo, Y., Zeng, W. e Jiang, K. (2011), “Preparation and Selective Laser Sintering of Wood-Plastic Composite Powders and Post Processing.” *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, Vol. 6, n. 3, pp. 1435-1444.

- Hejmadi, U. e McAlea, K. (1996), “Selective Laser Sintering of Metal Molds: The Rapidtool Process.” Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas.
- Hopkinson, N. e Dickens, P. (2001), “Rapid Prototyping for Direct Manufacture.” Rapid Protoyp. J., 7, pp. 197-202.
- Hopkinson, N. e Dickens, P. (2003), “Analysis of Rapid Manufacturing – Using Layer Manufacturing Processes for Production.” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 217, n. 1, pp. 31-39.
- Junior, P. e Marques, D. (2013) “Impressoras 3D: Redução de Custo e Tempo no Desenvolvimento de Produtos.” Tecnologia em Mecatrónica Industrial. Faculdade de Tecnologia de Garça – FATEC.
- Kellens, K., Yasa, E., Renaldi, Dewulf, W., Kruth, J.P. e Duflou, J.R. (2011), “Energy and Resource Efficiency of SLS/SLM Processes.” International Solid Freeform Fabrication Sympsiom – An Additive Manufacturing Conference. Edição: 22, Artigo N°79. Austin, Texas.
- Kruth, J.P., Levy, G., Klocke, F. e Childs, T.H.C. (2007), “Consolidation Phenomena in Laser and Powder-Bed Based Layered Manufacturing.” Annals of the CIRP – Manufacturing Technology, Vol. 56, pp. 730-759.
- Kruth, J.P., Mercelis, P., Froyen, L. e Rombouts, M. (2005), “Binding Mechanisms in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting.” Rapid Prototyping Journal, 55/1: 26-36.
- Kruth, J.P., Vandenbroucke, B., Vaerenbergh, J.V. e Mercelis, P. (2005), “Benchmarking of Different SLS/SLM Processes as Rapid Manufacturing Techniques.” Int. Conf. Polymers & Moulds Innovations (PMI), Gent, Belgium.
- Kumar, S. e Kruth, J.P. (2008), “Wear Performance of SLS/SLM Materials.” Advanced Engineering Materials, Vol. 10, n. 8.
- Kumar, S. e Pityana, S. (2011), “Laser-Based Additive Manufacturing of Metals”. Advanced Materials Research, 227, 92.
- Larsson, M., Lindhe, U. e Harrysson, O. (2003), “Rapid Manufacturing with Electron Beam Melting (EBM) – A Manufacturing Revolution?” In: BourellID, et al, editors. Proceedings Solid Freeform Fabrication Symposium, pp. 433-438. Austin, Texas.
- Lino, F.J. e Neto, R.J. (2000), “A Prototipagem Rápida na Indústria Nacional.” 2º Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Mecânica da Ordem dos Engenheiros, pp. 4.15-4.22, Coimbra, Dezembro.
- Mancanares, C.G., Silva, J.C., Zancul, E.S. e Miguel, P.A.C. (2013), “Proposta de um Método de Seleção do Processo de Prototipagem Rápida para Fabricar uma Peça a partir de Especificações Técnicas.” XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Salvador, BA, Brasil, 08 a 11 de Outubro de 2013.
- Mesquita, R. e Marques, M. (1990), “Corte por Eletro-Erosão.” Folhas da Cadeira Tecnologia dos Processos de Corte. Instituto Superior Técnico, Lisboa. Cap. IV.

-
- Navratil, J., Stanek, M., Sanda, S., Manas, M., Manas, D., Mizera, D. e Bednarik, M. (2011), "Utilization of Direct Metal Laser Sintering in Injection Mold Design." *Annals of DAAAM & Proceedings*, pp. 1507-1508.
- Nichita, G.G. (2007), "An Review About Rapid Manufacturing." *ANNALS of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering*, Vol. VI (XVI), pp. 1417-1422.
- Pham, D.T. e Gault, R.S. (1998), "A Comparision of Rapid Prototyping Technologies." *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 38, pp. 1257-1287.
- Relvas, C. (2002), "Processos de Prototipagem Rápida no Fabrico de Modelos de Geometria Complexa: Estudo Realizado sobre o Modelo Anatómico da Mão." Tese de Mestrado em Design Industrial. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto.
- SASAM (2014), "Additive Manufacturing: SASAM Standardization Roadmap".
- Tuck, C. e Hague, R. (2006), "The Pivotal Role of Rapid Manufacturing in the Production of Cost Effective Customised Products." *International Journal of Mass Customisation*, Inderscience Publishers. Vol. 1, n. 2-2/2006.
- Tuck, C.J., Hague, R.J.M., Ruffo, M., Ransley, M. e Adams, P. (2008), "Rapid Manufacturing Facilitated Customization." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 21, n. 3, pp. 245-258.
- Vasconcelos, P., Lino, F.J. e Neto, R.J. (2001), "O Fabrico Rápido de Ferramentas ao Serviço da Engenharia Concorrente." *Publicação Tecnometal*. Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Viana do Castelo, Portugal.
- White, G. e Lynskey, D. (2013), "Economic Analysis of Additive Manufacturing for Final Products: An Industrial Approach." University of Pittsburgh, Swanson School of Engineering.

ANEXO A



ANEXO B

| Entradas | | | |
|--|----------|-------------------|----------|
| Descrição | Variável | Unidade | Valor |
| <i>Custo do operador de máquina</i> | Op | €/h | 7,5 |
| <i>Tempo de set-up</i> | Set | h | 0,5 |
| <i>Tempo de pós-processamento por construção</i> | Pos | h | 0 |
| <i>Número total de unidades</i> | N | | 6 |
| <i>Energia usada</i> | E | kwh | 6 |
| <i>Custo da energia usada</i> | CE | €/kwh | 0,1133 |
| <i>Volume de cada unidade</i> | V | cm ³ | 0,236318 |
| <i>Densidade do material sinterizado</i> | d | g/cm ³ | 7,9 |
| <i>Custo do material</i> | Cm | €/kg | 123 |
| <i>Custo de depreciação</i> | C | €/ano | 42500 |
| <i>Horas por ano</i> | H | h/ano | 500 |
| <i>Tempo de produção</i> | T | h | 1,5 |
| Tarifa estimada para indústria | | | |
| Modelo de Hopkinson e Dickens (2003) | | | |

| Saídas | | |
|---|-------------|-----------|
| Equação | Valor | |
| $C_{Energia} = (E \times CE) / N$ | 0,1133 | €/unidade |
| Massa de Material por unidade = $(d \times 1,1 \times V)$ | 0,002053603 | Kg |
| $C_{Mat} = M \times C_m$ | 0,252593221 | €/unidade |
| $CH = C / H$ | 85 | |
| $CC = CH \times T$ | 127,5 | |
| $CP = CC / N$ | 21,25 | |
| $C_{Pre} = Op \times (Set / N)$ | 0,625 | |
| $C_{Pos} = (Op \times Pos) / N$ | 0 | |
| $P = C_{Pre} + CP + C_{Pos}$ | 21,875 | €/unidade |
| $CT = P + C_{Mat} + C_{Energia}$ | 22,24089322 | €/unidade |

