



Marcella de Amorim Guerra Duarte

**Desenvolvimento de projeto de produto para uso de
manufatura aditiva: um estudo de caso com o
desenvolvimento de robôs de combate**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo programa de Pós-
graduação em Design do Departamento de Artes e Design
da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Jorge Roberto Lopes dos Santos

Rio de Janeiro

Dezembro de 2019



Marcella de Amorim Guerra Duarte

**Desenvolvimento de projeto de produto para uso de
manufatura aditiva: um estudo de caso com o
desenvolvimento de robôs de combate**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo programa de Pós-
graduação em Design da PUC-Rio. Aprovada pela
Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Jorge Roberto Lopes dos Santos

Orientador

Departamento de Artes e Design – PUC-Rio

Prof. Claudio Freitas de Magalhães

Departamento de Artes e Design – PUC-Rio

Profa. Natascha Scagliusi

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Todos os direitos reservados. É proibido a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade da autora e do orientador.

Marcella de Amorim Guerra Duarte

Graduou-se em Desenho Industrial – Projeto de produto na PUC-Rio (Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro) em 2016. Foi bolsista PIBIC por 3 anos no laboratório NEXT (Núcleo de Experimentação Tridimensional), desenvolvendo diversos projetos na área de manufatura aditiva. Participou de diversas exposições e congressos na área de design de produto. Ganhou diversos prêmios na área de combate de robôs.

Ficha Catalográfica

Duarte, Marcella de Amorim Guerra

Desenvolvimento de projeto de produto para uso de manufatura aditiva: um estudo de caso com o desenvolvimento de robôs de combate / Marcella de Amorim Guerra Duarte ; orientador: Jorge Roberto Lopes dos Santos. – 2019.

138 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Artes e Design, 2019.

Inclui bibliografia

1. Artes e Design – Teses. 2. Impressão 3D. 3. Robô. 4. Design. 5. Robótica. 6. Inovação. I. Santos, Jorge Roberto Lopes dos. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Artes e Design. III. Título.

CDD: 700

Para a minha família, Martha, Mônica, Marcia, Roberto, Daniel e Manuela pelo
apoio e confiança.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Jorge Roberto Lopes dos Santos pelo estímulo e parceria para a realização deste trabalho.

À Prof. Dra. Rita Maria Couto pela ajuda no desenvolvimento dessa dissertação.

À CAPES e a PUC-Rio pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus amigos e colegas do Laboratório NEXT por todo apoio paciência e compreensão.

À minha família pela educação, atenção e carinho de todas as horas.

Aos meus professores pelas importantes contribuições e palavras de apoio.

Aos meus colegas da PUC-Rio.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Artes e Design pelos ensinamentos e pela ajuda.

A todos que de alguma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Duarte, Marcella de Amorim Guerra, dos Santos, Jorge Roberto Lopes. **Desenvolvimento de projeto de produto para uso de manufatura aditiva: um estudo de caso com o desenvolvimento de robôs de combate.** Rio de Janeiro, 2019. 138p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Artes e Design, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As tecnologias de manufatura para desenvolvimento de produtos evoluíram exponencialmente com o contínuo avanço dos algoritmos matemáticos e das interfaces de softwares cada vez mais intuitivos. Esse binômio potencializou a atual revolução digital, na qual se destaca a tecnologia de impressão 3D. Essa tecnologia cada vez mais acessível possibilita que usuários possam desenvolver protótipos físicos e até mesmo produzir por conta própria produtos para o mercado consumidor, atividade até então exclusiva das indústrias de manufatura. Uma das principais barreiras do processo ainda é o desenvolvimento de arquivos tridimensionais digitais, tornando-se necessário um entendimento específico na combinação do meio virtual com o meio físico. A compreensão do processo fomenta as diversas possibilidades que a impressão 3D pode oferecer no desenvolvimento de produtos inovadores. Essa tecnologia revoluciona a forma como projetamos, produzimos e consumimos. Para essa dissertação, estudos de casos focados em combate de robôs, uma área específica da robótica, foram desenvolvidos de forma inovadora, com comprovada eficácia em atuação.

Palavras-chave

Impressão 3D; manufatura aditiva; design; inovação; tecnologia; robótica; robô.

Abstract

Duarte, Marcella de Amorim Guerra, dos Santos, Jorge Roberto Lopes (AAdvisor). **Product design development for additive manufacturing use: a case of study with the development of combat robots**. Rio de Janeiro, 2019. 138p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Artes e Design, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Manufacturing technologies for product development have evolved exponentially with the continued advancement of mathematical algorithms and increasingly intuitive software interfaces. This binomial has potentiated the current digital revolution, in which 3D printing technology stands out. This increasingly accessible technology enables users to develop physical prototypes and even produce products for the consumer market, a previously unique activity in the manufacturing industries. One of the main barriers of the process is still the development of three-dimensional digital files, making it necessary a specific understanding in the combination of the virtual environment with the physical environment. Understanding the process fosters the many possibilities that 3D printing can offer in the development of innovative products. This technology revolutionizes the way we design, produce and consume. In this dissertation, case studies focused on robot combat, a specific area of robotics, were developed in an innovative way, with proven effectiveness in action.

Keywords

3D printing; additive manufacturing; design; innovation; technology; robotic; robot.

Sumário

Capítulo I – Introdução	18
Capítulo II – A Manufatura Aditiva	24
2.1 Manufatura aditiva e o seu acontecimento	26
2.2 Processos das tecnologias de manufatura aditiva	30
2.2.1 Extrusão de material (FFF – <i>Fused filament fabrication</i>)	31
2.2.2 Polimerização (SLA - <i>Stereolithography</i> e DLP – <i>Direct light processing</i>)	32
2.2.3 Sinterização seletiva a laser (SLS - <i>Selective laser sintering</i>)	32
2.2.4 Impressão por jato (<i>Material Jetting</i>)	33
2.2.5 Impressão por jato (<i>Binder Jetting</i>)	34
2.2.6 Fusão de cama de pó de Metal (DMLS/SLM - <i>Direct metal laser sintering/Select laser melting</i>)	35
2.3 Especificações e características	36
2.3.1 Materiais	40
2.3.2 Pós-impressão	42
2.3.3 Vantagens	43
2.3.4 Limitações	45
2.4 Conclusões	46
Capítulo III – Designing para manufatura aditiva	48
3.1 Representação geométrica 3D	49
3.1.1 Desenho auxiliado por computador (CAD) e o formato STL	51
3.1.2 Design generativo	55
3.1.3 Digitalização tridimensional	57
3.2 Aplicações	59
3.2.1 Moda	59
3.2.2 Construção civil	60
3.2.3 Gastronomia	61
3.2.4 Medicina	63
3.2.5 Esporte	64
3.3 Conclusões	65

Capítulo IV – A nova era da manufatura	67
4.1 A revolução dos modos de fabricação	69
4.1.1 Custos	71
4.2 Fabricação pessoal	72
4.3 Indústria 4.0	74
4.4 Conclusões	77
Capítulo V – Estudos de caso no combate de robôs	79
5.1 A manufatura aditiva aplicada ao combate	85
5.2 Estudos de casos	90
5.2.1 Lumiere (150g)	94
5.2.2 Donut (456g)	99
5.2.3 Sun Tzu (456g)	104
5.2.4 Fera (1360g)	108
5.2.5 Hannibal (1360g)	115
5.3 Conclusões	123
Capítulo VI – Conclusões e recomendações	126
6.1 Potencialidades futuras	127
Referências bibliográficas e eletrônicas	132
Apêndice	136

Lista de Figuras

Figura 1: representação do crescimento do mercado de impressão 3d.	21
Figura 2: capas de revistas com temática de impressão 3d.	21
Figura 3: principais variações da nomenclatura	22
Figura 4: representação da linha do tempo da história da impressão.	24
Figura 5: primeiro projeto de arma de fogo disponibilizado na internet para download.	25
Figura 6: a) pirâmides do egipto. B) ilustração da patente apresentada em 1982. C) ilustração explicando o processo de foto escultura.	26
Figura 7: impressora 3d rápida de líquidos em uso.	27
Figura 8: primeira impressora 3d de sla, sla-1, e sua patente registrada em 1984 por hull	28
Figura 9: a) primeira impressa sls criada pela dtm; b) primeira impressora fff criada pela stratasys	28
Figura 10: todas as partes plásticas da máquina à direita foram produzidas pela máquina à esquerda. Adrian bowyer (à esquerda) e vik olliver (à direita) são membros do projeto reprop	29
Figura 11: tabela com os processos de impressão 3d	31
Figura 12: processo de impressão fff.	32
Figura 13: processo de impressão sla.	32
Figura 14: processo de impressão sls.	33
Figura 15: processo de impressão por jato.	34
Figura 16: processo de impressão por binder.	35
Figura 17: processo de impressão dmls/slm.	36
Figura 18: representação do processo de impressão 3d.	36
Figura 19: representação de um objeto fatiado	37
Figura 20: diferentes espessuras de camadas usando a tecnologia fff.	37
Figura 21: representação do suporte na peça, depois retirado e pós-processado.	38
Figura 22: representação do método yht.	39
Figura 23: representação da tolerância.	39
Figura 24 representação dos tipos e percentagens do preenchimento.	40
Figura 25: as três formas de material encontradas, filamento, resina	

e pó.	41
Figura 26: pó de metal sendo retirado da peça impressa.	41
Figura 27: o projeto, intitulado g3dp, representa o primeiro desse tipo de processo de impressão de vidro opticamente transparente.	42
Figura 28: impressões pós-processadas: solda a frio, preenchimento de lacunas, não processada, lixada, polida, pintada e revestida com epóxi.	43
Figura 29: a impressão 3d e escaneamento aplicada a odontologia.	43
Figura 30: chave inglesa impressa em metal.	44
Figura 31: objeto impresso em diferentes materiais e cores.	44
Figura 32: demonstração da mesma peça impressa em sla e fff para mostra que a tecnologia pode interferir no objetivo pretendido com a peça.	45
Figura 33: amostra de impressões 3d usando filamentos compostos.	46
Figura 34: animaris geneticus parvus, do artista theo jansen é o objeto mais difícil impresso pelo site de serviços de impressão shapways.	49
Figura 35: mesa de trabalho com as tecnologias a disposição.	49
Figura 36: exemplo de uma simulação rodada no software netfabb.	50
Figura 37: software solidworks de modelagem de sólidos.	51
Figura 38: software rhinoceros de modelagem de superfícies.	52
Figura 39: software zbrush de escultura.	52
Figura 40: o software online mais popular atualmente o thinkercad.	53
Figura 41: representação de um arquivo em cad e em stl.	54
Figura 42: cores e textura no formato obj.	54
Figura 43: processo de criação utilizando o design generativo.	55
Figura 44: soluções geradas pelo software para um problema.	56
Figura 45: exemplo de otimização de topologia e não de design generativo.	56
Figura 46: processo de impressão 3d, e o modelo virtual gerado.	57
Figura 47: representação da qualidade versus resolução no escaneamento 3d.	58
Figura 48: fluxograma dos scanners do mercado, características e aplicações.	58
Figura 49: simulação do vestido para impressão 3d e o	

vestido impresso.	60
Figura 50: tênis futurecraft 4d e a sola sendo impressa.	60
Figura 51: a cabine de curiosidades impressas em 3d.	61
Figura 52: the office of future externamente e internamente.	61
Figura 53: processo de produção dos moldes e um bolo finalizado.	62
Figura 54: impressoras usadas pelo food ink e um prato finalizado.	62
Figura 55: a prótese criada do projeto e em utilização.	63
Figura 56: modelo impresso da mãe e do feto.	64
Figura 57: tacos impressos em 3d.	64
Figura 58: otimização da peça, e a nova peça impressa ao lado da antiga	65
Figura 59: duas crianças em casa utilizando uma impressora 3d.	68
Figura 60: representação da fabricação subtrativa.	69
Figura 61: representação do processo formativo.	69
Figura 62: representação do processo aditivo.	69
Figura 63: a peça impressa que será substituída na nova turbina.	70
Figura 64: molde de injeção impresso em 3d usado para fabricar um pequeno lote de gabinetes de sensores.	71
Figura 65: tabela de custo por parte nas três áreas de manufatura.	71
Figura 66: maker faire new york 2018.	73
Figura 67: garagem fab lab em são paulo.	74
Figura 68: gráfico com revoluções industriais.	75
Figura 69: gráfico comparativo de manufatura aditiva e manufatura tradicional.	76
Figura 70: garras personalizadas usadas em um braço robótico automatizado para posicionar.	77
Figura 71: primeiro evento design 2.007 no mit.	79
Figura 72: primeira competição de combate em 1994.	80
Figura 73: gráfico com a evolução dos competidores e robôs no brasil.	80
Figura 74: equipe riobotz e o robô minotauro.	81
Figura 73: robôs de diferentes categorias de peso.	82
Figura 75:a) arena de combate; b) robôs de diferentes categorias.	82
Figura 76:a) logo lbr; b) evento hackcombot 2019.	83
Figura 77: gráfico com o crescimento de robôs nas categorias	

de insetos.	83
Figura 78: esquemático com os tipos de arma e qual se sobressai sobre a outra.	83
Figura 79: a) software de modelagem cad; b, c) exemplos de fabricação digital, fresa cnc e impressão 3d.	84
Figura 80: robôs antweight de plástico.	86
Figura 81: peça do robô sawblaze impressa em metal e no robô.	87
Figura 82: impressoras disponíveis para os participantes imprimirem.	88
Figura 83: a) robô hypershock.; b) robô quantum.	88
Figura 85: a) robô ddt antweight em 2015; b) robôs silent spring 2019.	89
Figura 84: a) robô valkyrie; b) protótipo em escala real do valkyrie; c) protótipo da engrenagem impressa e a peça final.	89
Figura 86: impressora makerbot replicator 2.	90
Figura 87: etapas de desenvolvimento do novo projeto do robô pocket.	91
Figura 88: tampas impressas em pla transparente.	91
Figura 89: cronut e sua estrutura impressa.	92
Figura 90: a) robô sendo impresso com os discos de fixação; b) programação da peça no software de fatiamento.	93
Figura 91: peça impressa em náilon empenada.	93
Figura 92: comparação de um furo impresso horizontalmente e um furo impresso verticalmente.	94
Figura 93: lumiere com a medalha de prata.	95
Figura 94: chassi com o suporte solúvel no software de fatiamento e impressos.	95
Figura 95: chassi sendo impresso e posteriormente submerso em água para dissolução do suporte.	96
Figura 96: processo de desenvolvimento do projeto. Fonte: autora.	96
Figura 97: peças do lumiere em náilon.	97
Figura 98: a) comparação de uma peça com náilon úmido e seco; b): erro de impressão.	97
Figura 99: secador de filamento.	98
Figura 100: chassi, tampas e suportes de motores impressos.	98
Figura 101: peça tratadas em forno caseiro.	99
Figura 102: lumiere destruído após competição.	99

Figura 103: primeira versão do donut.	100
Figura 104: chassi do donut impresso em pla.	100
Figura 105:chassi do donut impresso em náilon cf com fios.	101
Figura 105: bicos em latão, inox e temperado.	101
Figura 107: chassi do donut sendo impresso em material flexível.	102
Figura 108:chassi do donut em cheetah™.	102
Figura 109: donut em combate.	103
Figura 110: a) cola em spray para impressão. Fonte: cliever; b) mesa aquecida da ultimaker 3.	103
Figura 111: donut em náilon e suas outras versões.	104
Figura 112: primeira versão do sun tzu.	104
Figura 113: revestimento xtc-ed e aplicado no chassi.	105
Figura 114: peças impressas do suntzu.	105
Figura 115: base em pla.	106
Figura 116:a) frente rammer; b) frente vertical spinner; c) frente horizontal spinner.	106
Figura 117: tambor impresso em metal inox.	107
Figura 118:a) encaixe da base rígida e frente flexível b) frente flexível; c) base quebrada.	107
Figura 119: base do sun tzu sendo impressa e finalizada em náilon cf.	108
Figura 120: sun tzu na versão vencedora.	108
Figura 121:primeira versão do fera e seu chassi sendo usinado.	109
Figura 122: a) modelo no software da fresa; b) chassi usinado em uhmw.	109
Figura 123: protótipo do fera e seus componentes.	110
Figura 124: a) peça no software de fatiamento; b) camadas visíveis da impressão.	110
Figura 125: peças impressas e o encaixe dovetail.	111
Figura 126:a) vista superior do chassi mostrando filetes; b) fresa em funcionamento.	111
Figura 127: acessórios em ultimaker pc e uhmw.	112
Figura 128: peça exemplo dos métodos de fixação com parafuso.	113
Figura 129: inserto roscado no chassi.	113

Figura 130: anodização em andamento e as peças finalizadas.	114
Figura 131: versões do fera até chegar a atual.	114
Figura 132: hannibal e sun tzu.	115
Figura 133: protótipo do hannibal em pla e a makerbot z18.	115
Figura 134: a) chassi em pla resinado; b) chassi fresado em uhmw.	116
Figura 135: hannibal e sun tzu.	116
Figura 136: efeito nas propriedades mecânicas.	117
Figura 137: hannibal e sun tzu.	117
Figura 138: chassi do Hannibal em Ultimaker PC.	118
Figura 139: chassi do Hannibal em náilon.	118
Figura 140: frente <i>rammer</i> em Cheetah™.	119
Figura 141: frente do vertical em Cheetah™.	119
Figura 142: frente em ultimaker pc.	119
Figura 143: frente em cheetah™.	119
Figura 144: composição de material flexível e rígido no hannibal.	120
Figura 145: cavidade na estrutura para a porca quadrada.	120
Figura 146: cavidade modelada no cad e com a porca no robô.	121
Figura 147: suporte motores.	122
Figura 148: hannibal no winter challenge em 2018.	122
Figura 149: a) danos na estrutura da base; b) peças desenvolvidas para o hannibal.	123
Figura 150: robôs antweight e beetleweight.	123
Figura 151: hackcombat 2019.	124
Figura 152: processo de desenvolvimento.	125
Figura 153: o futuro da impressão 3D.	128
Figura 154: tabela com o aumento das vendas de MA em metal.	129
Figura 155: demonstração da impressão 4D.	130
Figura 156: uma orelha que foi impressa utilizando células vivas.	131

Lista de abreviaturas

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

CAD – *Computer Aided Design*

FDM – *Fused Deposition Modeling*

NEXT – Núcleo de Experimentação Tridimensional

SLS – *Selective Laser Sintering*

PUC-Rio – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

DLP – *Direct Light Processing*

DMLS – *Direct Metal Laser Sintering*

FAPERJ – Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do

Estado do Rio de Janeiro

MIT – Massachusetts Institute of Technology

STL – *Standard Triangulation Language*

MA – Manufatura Aditiva

FFF – *Fused Filament Fabrication*

SLA – *Stereolithography*

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

PLA – *Polylactic Acid*

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

SLM – *Select laser melting*

ISO – International Organization for Standardization

ASTM – American Society for Testing and Materials

UV – Radiação ultravioleta

SLM – *Selective laser melting*

AMF – *Additive Manufacturing File Format*

TC – Tomografia computadorizada

RM – Ressonância magnética

CNC – Comando numérico computadorizado

GE – *General Electric*

CA – Cianoacrilato

Capítulo I – Introdução

Nos últimos 2 milhões de anos foram criadas diversas ferramentas, tais como o fogo, a roda, o carro, o computador... que nos ajudaram a formatar o mundo como o conhecemos hoje (Macgregor, 2013). Porém, por mais que essas ferramentas tenham feito muitos produtos se tornarem possíveis, também definiram formatos e limitaram nossa imaginação de acordo com a sua época. Nos próximos anos a maneira como produziremos será diferente da atual. Segundo Bull et al. (2010):

[...]se o século XX foi caracterizado pela democratização da informação através do computador pessoal e pela internet, o século XXI será caracterizado pela democratização da produção pela fabricação pessoal. (BULL et al., 2010)

Estamos despertando a para terceira revolução digital: a da fabricação. As duas revoluções passadas, a da computação e a da comunicação, transformaram o mundo nos últimos anos e a terceira nasce para preencher uma lacuna deixada por elas: o mundo físico em que vivemos. Os três irmãos Neil, Alan e Joel Gershenfeld afirmam em seu livro: “[...]A terceira revolução digital é construída no mesmo fundamento da ciência digital, só que agora permite a manipulação exponencial de ambos bits e átomos”.¹

“Baseado em funções matemáticas, produtos gerados por softwares permitem o desenvolvimento de novas formas que seriam difíceis, se não impossíveis, de se conceber ou produzir com a mesma precisão dos métodos tradicionais[...]” (Labado, 2013)². A manufatura está caminhando para grandes mudanças que podem ser ainda maiores das já vividas, desde a primeira, que foi a revolução industrial cuja característica foi a produção mecanizada com o uso máquinas à vapor; passando pela segunda, marcada pela produção em massa com a ajuda da energia elétrica; e a terceira, marcada pela automação de processos utilizando tecnologias da informação.

¹ Tradução livre do original: “[...]This revolution is built on the same fundamental science of digital, only now it enables both bits and atoms to be exponentially manipulated.” (GERSHELFELD, GERSHELFELD e GERSHELFELD, 2017, p5).

² Tradução livre do original: *based on mathematical functions, software-generated design allows for the development of new forms of geometries that would be hard if not impossible to conceive or produce with the same precision by means of traditional methods. [...]* (LABADO, 2013, p10).

Em um futuro próximo acredita-se que os produtos fabricados irão ser cultivados, os construídos irão crescer, passarão de isolados para conectados e de extraídos para agregados. Terão mais variedade, conectividade, dinamismo, complexidade, adaptabilidade e mais beleza (Wujec, 2011). Novas formas, antes impossíveis de serem fabricadas, serão diferentes das já conhecidas, amplificando a parceria entre tecnologia, natureza e o ser humano.

A manufatura tradicional focada em quantidade e lucro passará por significativas mudanças. Usuários ao redor mundo sem acesso à produção em grande escala, hoje, estão fora do grande mercado produtor. Mas esse cenário está mudando. Qualquer pessoa com acesso a uma impressora 3D possui a capacidade de produzir por conta própria, poucas ou únicas unidades, diretamente da sua mesa de trabalho. O mercado está mudando para uma produção descentralizada que não afeta somente a grande indústria, mas também qualquer um que queira produzir. Os benefícios das novas ferramentas são revolucionários, tais como redução de custos, tempo, formas e materiais.

Ainda há um longo caminho para que a MA fique disponível a maioria da população, mas poderemos ver cada vez mais mudanças no mercado como um todo, com o passar do tempo. Existem muitos desafios a serem ultrapassados e não podemos prever o que faremos com todas as possibilidades que a impressora 3D nos proporciona, mas segundo Carl Bass³, é possível afirmar: “[...]O modo como produzimos hoje não será como produziremos amanhã.”

Em uma nova era, um novo pensamento para projetar é necessário (Dewar, 1998). No presente, se um objeto não pudesse ser produzido, só poderia ser imaginado. Porém, graças a computadores potentes e programas complexos, projetar e fabricar um produto “perfeito” em termos de forma e função tornou-se possível. Produzir objetos conhecidos mudando somente sua estética é o que mais vemos atualmente. Unir estética e função de acordo com a necessidade do projeto é uma realidade para usuários que se utilizam das tecnologias digitais para inovar na sua área de atuação. No computador ele configura quais são os objetivos desejados, permitindo a criação de milhões de alternativas para sua escolha. Desenhar uma cadeira única, por exemplo, não é simplesmente alterar sua forma. É

³ Carl Bass é engenheiro Ex-CEO da Autodesk, e um grande entusiasta da tecnologia de impressão 3D. A Autodesk, Inc., é líder em software de design 3D, engenharia e entretenimento.

definir o peso a ser suportado, leveza, preço, material e ser esteticamente atraente. (Akella, 2018)

O novo modo de desenvolvimento de produtos passa por um processo complexo de adaptação. A criatividade demanda um novo conhecimento do homem sobre as máquinas que oferecem uma imensa liberdade na hora de criar, mas a sua utilização requer técnicas e conhecimento para que haja uma real inovação e progresso em projetar e alcançar o máximo das novas ferramentas de desenvolvimento. Segundo Baxter:

A atividade de desenvolvimento de um novo produto não é tarefa simples. [...] o casamento entre ciências sociais, tecnologia e arte aplicada nunca é uma tarefa fácil, mas a necessidade de inovação exige que ela seja tentada. (BAXTER, 2011)

A compreensão do processo como um todo é de suma importância. A impressora 3D não age por si mesma e não produzirá nada sem um arquivo modelado e preparado para a impressão. A interação entre ideia, produção e aplicação é fundamental para se obter êxito. Um produto com design não é apenas aquele com uma estética satisfatória, mas também o pensado na forma que será produzido, para economizar custos e tempo de produção bem como será descartado, para não provocar danos ambientais. (Gershenfeld, 2017)

O mercado da MA desde o seu surgimento tem sido muito dinâmico e vem apresentando um crescimento considerável. Passou de um pouco mais de 1 bilhão de dólares em 2007 para valores acima de 7 bilhões em 2016. O valor de mercado praticamente dobrou nos últimos anos e a expectativa de crescimento é ainda maior até 2020. (Figura 1) Grande parte desse crescimento se deu por meio da venda de sistemas de impressão 3D, materiais, suprimentos e serviços. O restante do crescimento vem do mercado secundário, incluindo ferramentas, moldagem e fundição. O Brasil representa uma fatia pequena desse mercado. Os Estados Unidos e Europa respondem por mais de 68% da receita e Ásia-Pacífico 27%. (Wohlers Report, 2015).⁴

⁴ Relatório anual da Wohlers Associates, especializado em manufatura aditiva. Disponível em: <<http://wohlersassociates.com/2015report.htm>>. Acesso em fev. 2018.

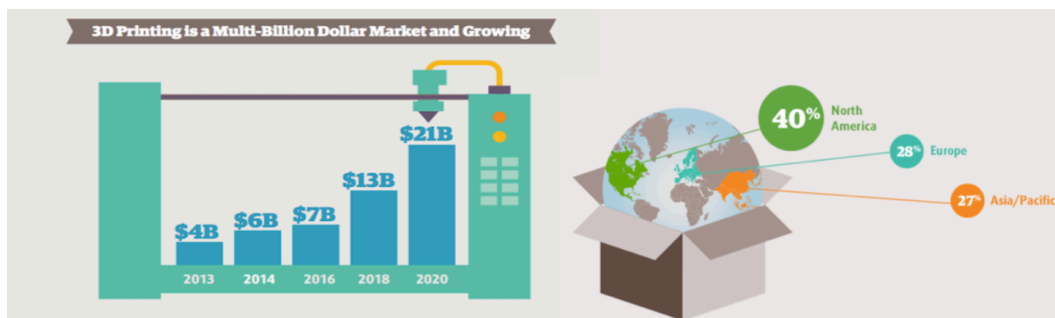


Figura 1: representação do crescimento do mercado de impressão 3D. Fonte: USPS.

Com o mercado em crescente expansão, o desafio de retratar um cenário atualizado dessa área é dificultado, pois sabe-se que diariamente o mesmo mudará. Em função disso, toma-se o cuidado de fugir de descrições de equipamentos específicos, dando ênfase aos princípios por trás das tecnologias de manufatura aditiva e como podemos utilizá-la na sua total potencialidade.

O que sabemos sobre a manufatura aditiva é instigante, mas o que não sabemos é ainda mais. Se nos afastarmos e criarmos uma linha do tempo imaginária é possível acreditar que estamos no início dessa história. Há muito a evoluir, pesquisas e experimentos por vir, não só na fabricação como nas tecnologias digitais. Chegamos a um patamar que a tecnologia está se tornando mais fácil e acessível a cada dia para todos os níveis da sociedade, sejam eles indivíduos, organizações ou instituições (Gershenfeld, 2017). Esse movimento pode ser comprovado pela vasta quantidade de projetos inovadores que se utilizam da manufatura aditiva para quebrar paradigmas e gerar novas possibilidades, conforme matérias de capas de revistas ao redor do mundo (Figura 2).



Figura 2: capas de revistas com temática de impressão 3D. Fonte: Google.

Há dificuldade de se encontrar sérios debates acadêmicos sobre o tema, principalmente no Brasil, pois o conhecimento técnico do uso das novas tecnologias de fabricação surge muito das experiências e práticas dos seus utilizadores, sendo essa uma das principais justificativas desse trabalho acadêmico.

Por tudo exposto ao longo dessa introdução, a dissertação tem como tema central a ser discorrido: a manufatura aditiva. Observa-se, no entanto, que com a popularização de algumas tecnologias, o termo impressão 3D tem sido adotado como sinônimo de manufatura aditiva e assim serão tratadas nesta dissertação (Figura 3). (Volpato et al., 2017)

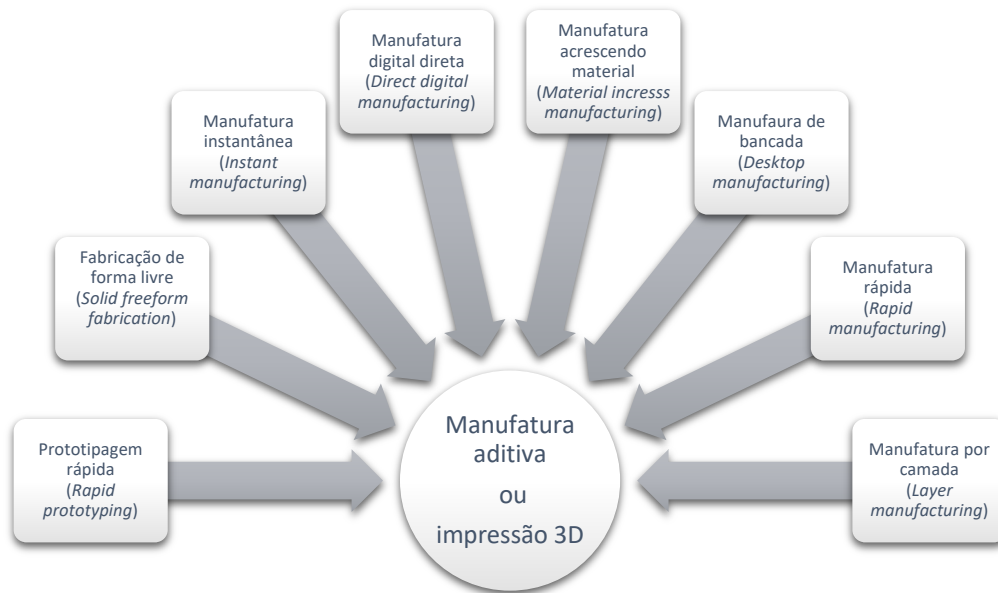


Figura 3: principais variações da nomenclatura Fonte: VOLPATO et al., 2017.

A hipótese de que a manufatura aditiva é caracterizada pelo uso de diversas tecnologias no seu processo, cada uma com seus próprios benefícios e limitações, oferecendo uma imensa liberdade aos usuários na hora de criar, e possibilitando o desenvolvimento de produtos com formas e estruturas complexas, poucas ou únicas unidades diretamente de sua mesa de trabalho vai ser discutida.

Para tal, a pesquisa possui uma característica exploratória voltada a investigar as abordagens do pensar e projetar para a impressão 3D por meio dos novos métodos de criação tridimensionais, tais como os softwares de CAD, design generativo e a digitalização 3D. Possui também uma característica experimental, com a finalidade de estimular a criação, a materialização e a prototipação de conceitos inovadores, aplicada em estudos de casos concentrados em uma especialidade da área de robótica: o combate de robôs.

Essa pesquisa está estruturada nos seguintes capítulos: I) Introdução; II) A manufatura aditiva; III) Designing para manufatura aditiva; IV) A nova era da manufatura; V) Estudos de caso no combate de robôs; VI) Conclusões e recomendações.

Por fim, que com o conhecimento transmitido e as experimentações relatadas, espera-se que os estudos acadêmicos sobre a MA possam avançar no Brasil e, especificamente, no esporte de combate de robôs ou, ao menos, servir de ponto inicial para uma reflexão, um debate mais aprofundado ou experimentos.

Capítulo II – A manufatura aditiva

A evolução tecnológica propiciou novas formas de empregar a palavra impresso, adicionando diferentes possibilidades tanto ao papel quanto aos produtos ao longo dos anos. Uma série de tecnologias inovadoras difundiram a impressão na cultura da humanidade, gerando impactos sociais e culturais na sociedade. Ratificando: “A tecnologia pode ser explicada como experiência, habilidade e feitos alcançados através da prática. Pode ser vista como um meio para um fim. Isto é, todos os atos e métodos eficazes podem ser considerados como tecnologias”⁵ (Chen, 2014)

A máquina de escrever tornou a impressão padronizada acessível. O processo de configuração dos tipos móveis⁶ continuou a passar por transformações radicais com o desenvolvimento de tubos e tecnologias a laser. A máquina Xerox⁷ proporcionou documentos impressos disponíveis para todos. Os programas de edição de texto transformaram a forma como escrevemos e trouxe a flexibilidade para o processo da escrita. A impressão por meio de computadores passou por vários estágios de inovação, desde as primeiras impressoras de matriz de pontos até as impressoras jato de tinta, laser e transferência térmica (Figura 4). Dewar afirma que: “[...] a impressão teve enorme influência em diversos aspectos da cultura, tais como mudanças sociais, políticas e psicológicas.” (Dewar, 1998)



Figura 4: representação da linha do tempo da história da impressão. Fonte: American Printing History Association.

⁵ Tradução livre do original: “Technology can be explained as experience, skill and feat gained through practice. It can be seen as a means to an end. That is, all effective acts and methods can be regarded as technologies.” CHEN, Dejun.; XIE, Shane.; ZHOU, Zude. Fundamentals of digital manufacturing science. Nova Iorque: Springer, 2012, p. 248.

⁶ Inventado por Johannes Gutenberg, na Alemanha, foi baseada na utilização de uma prensa de madeira, como um processo de imagem espelhada da letra na qual era pressionado em um metal formando o tipo, posto em uma matriz para dar forma a página do texto. Disponível em: <https://www.printi.com.br/blog/tipos-moveis-criacao-da-tipografia>. Acesso em: Out 2018

⁷ A Xerox 914, de 1959, foi a primeira fotocopiadora totalmente automatizada do mundo é considerado um dos maiores sucessos comerciais individuais de todos os tempos, e revolucionou a cópia de livros e documentos. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/mercado/123586-historia-xerox-empresa-virou-sinonimo-fotocopia-video.htm>. Acesso em: Out 2018

Um olhar mais aprofundado sobre a história da impressão mostra que a criação da imprensa como a conhecemos hoje dependeu de uma soma de transições culturais e tecnológicas que se desenvolveram por vários séculos. A impressão 3D também precisará passar por anos de mudança e evoluções antes da sua popularização na sociedade. (Dewar, 1998) É difícil prever o futuro da manufatura aditiva principalmente porque as tecnologias do amanhã ainda estão sendo desenvolvidas hoje. Com tantas áreas da sociedade afetadas, muitos efeitos são transitórios, insignificantes, contraditórios e até indesejáveis.

É o caso da impressão 3D de armas de fogo, utilização impensada da tecnologia até surgir o primeiro projeto publicado na internet em 2013 por Cody Wilson⁸ (figura 5). O futuro poderá ser dominado por consequências não intencionais. Assim, é improvável que os pesquisadores sejam precisos e os desenvolvedores tenham sempre os resultados pretendidos.



Figura 5: primeiro projeto de arma de fogo disponibilizado na internet para download. Fonte: CNET

Demoramos a entender como as tecnologias funcionam e como realmente aplicá-las para aquilo que foram pensadas, até a incorporação no dia-a-dia. As mudanças culturais são geralmente lentas, diferentemente das tecnológicas. Estas são velozes não se prolongando por séculos como costumava acontecer. Desde o surgimento das impressoras 3D temos 40 anos somente. É compreensível não sabermos como extrair todas as suas potencialidades e vermos, de modo geral, um

⁸ Disponível em: <<https://www.cnet.com/news/the-3d-printed-gun-controversy-everything-you-need-to-know/>>. Acesso em: 16 out. 2018.

desgaste com relação a sua utilização, voltada para o pensamento de fabricação tradicional gerando produtos sem qualquer justificativa da utilização da MA no processo de fabricação.

2.1 Manufatura aditiva e o seu acontecimento

A construção de objetos sobrepondo camada a camada não é um conceito novo. Remonta ao antigo Egito com as construções de pirâmides com blocos sendo colocados uns sobre os outros (Figura 6A). Passa pela topografia, cujo início deu-se em 1892 com o método de construção de camadas para mapas topográficos de Blantner⁹ (Figura 6B); e pela foto escultura desenvolvida no séc. XIX por François Willème¹⁰, para criar réplicas de objetos e formas humanas (Figura 6C). Volpato et al. afirma em seu livro:

[...]Os trabalhos de pesquisas, técnicas e processos desenvolvidos para a foto escultura e para a topografia deram origem as atuais técnicas de manufatura aditiva. Toda via, essas técnicas passaram a ser empregadas de forma mais intensa somente após o aparecimento de equipamentos comerciais, sendo o primeiro deles lançado a partir da tecnologia SLA-1 (*stereolithography apparatus*), apresentado pela empresa americana 3D Systems em 1987. (VOLPATO et al., 2017)

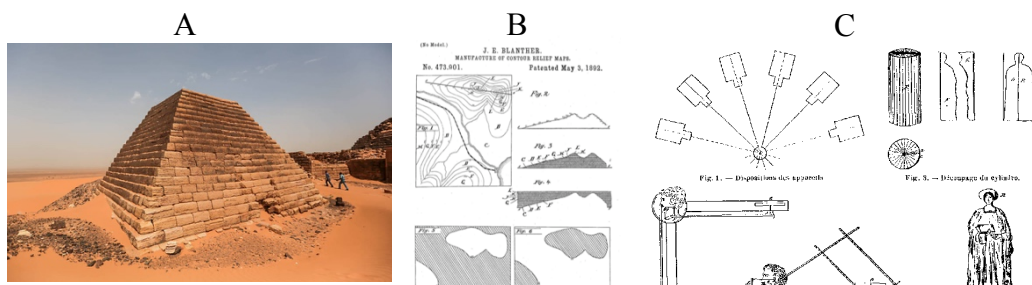


Figura 6: a) pirâmides do Egito. b) ilustração da patente apresentada em 1892. c) ilustração explicando o processo de foto escultura. Fonte: Google.

A MA pode ser definida como um processo de fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação digital tridimensional do objeto, permitindo fabricar componentes físicos a partir de vários tipos de materiais em diferentes formas e

⁹ Joseph E. Blantner. Manufacture of contour relief-maps. USA nº 473901, 24 abr. 1890, 03 maio 1982. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/86/2f/0c/068f23e0fa552c/US473901.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2018.

¹⁰ François Willème (27 de maio de 1830 - 31 de janeiro de 1905) foi um artista francês (pintor, escultor e fotógrafo) que desenvolveu e patenteou o processo de foto escultura.

princípios. O processo de construção é totalmente automatizado e ocorre de maneira relativamente rápida se comparado aos meios tradicionais de fabricação. (Hopkinson; Hague; Dickens, 2006)

Nos processos mais comuns as camadas são planas, o que, tecnicamente está em transformação com o desenvolvimento de impressoras que adicionam material seguindo a geometria da peça e não o seu traçado, como é o caso da impressão rápida de líquidos¹¹ desenvolvida pelo Self-Assembly LAB do MIT (Massachusetts Institute of Technology) em 2017:

“[...]A impressão líquida rápida pode produzir produtos em grande escala a partir de materiais de alta qualidade tais como, borracha, espuma, ou plástico em uma questão de segundos ou minutos, desenhando-os em uma suspensão de gel.” (Figura 7) (*Self-Assembly Lab*, 2017)



Figura 7: impressora 3D rápida de líquidos em uso. Fonte: Self-Assembly LAB.

As impressoras 3D não são uma tecnologia recente. Existem desde os anos 80 quando Hideo Kodama, do Instituto Municipal de Pesquisa Industrial de Nagoya, em 1981, criou um sistema funcional de prototipagem rápida usando polímero fotossensível. Um modelo sólido e impresso foi construído em camadas, cada uma das quais correspondia a uma fatia de seção transversal no modelo. (Golberg, 2018)

¹¹ A impressão rápida de líquidos é incrivelmente rápida (produz estruturas em questão de minutos), projetada para produtos de grande escala (você pode imprimir uma peça inteira de mobília) e utiliza materiais de nível industrial do mundo real. SELF-ASSEMBLY LAB (Eua). Mit (Org.). Rapid Liquid Printing. 2017. Disponível em: <<https://selfassemblylab.mit.edu/rapid-liquid-printing>>. Acesso em: 17 set. 2018.

Três anos depois da descoberta de Hideo Kodama, Charles Hull, em 1984, inventou e patenteou a estereolitografia (SLA) (Figura 8), criando um marco na história para que usuários utilizando dados digitais pudessem criar um objeto real, abrindo assim novos caminhos para a manufatura e acelerando o processo de prototipagem. Em 1986 Hull fundou a 3D Systems Corporation¹², uma empresa pioneira que continua a vender tecnologias de impressão 3D. (Golberg, 2018)

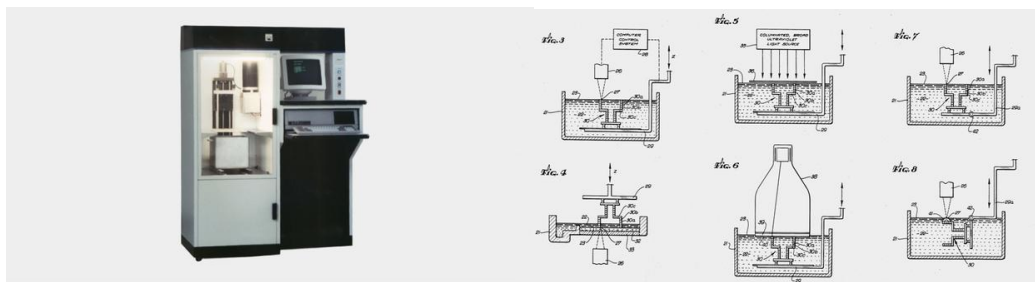


Figura 8: primeira impressora 3D de SLA, SLA-1, e sua patente registrada em 1984 por Hull.
Fonte: 3D Systems.

Em 1988, a DTM¹³ patenteou e lançou a primeira impressora usando a tecnologia SLS (*Selective Laser Sintering*) (Figura 9A). Logo depois, a *Stratasys*¹⁴, em 1992, patenteou e lançou a primeira impressora FFF (*Fused Filament Fabrication*) do mundo (Figura 9). A partir dessas descobertas, foram surgindo diferentes impressoras ao redor do mundo, que contribuíram para a evolução da tecnologia em diferentes áreas antes inconcebíveis, como na medicina. (Golberg, 2018)

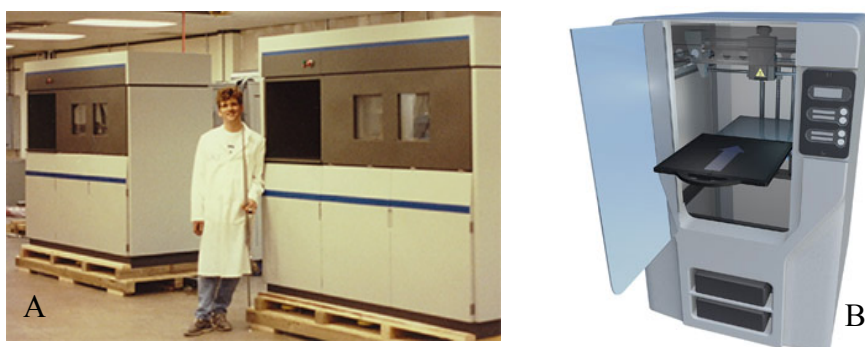


Figura 9: a) primeira impressa SLS criada pela DTM. Fonte: 3Dhubs; b) primeira impressora FFF criada pela Stratasys. Fonte: Stratasys.

¹² Cofundada por Hull, a 3D Systems se tornou uma empresa mundial de soluções em 3D que atua até hoje no mercado.

¹³ A Deckard e a Beaman fundaram a empresa DTM, para projetar e construir as impressoras SLS. Em 2001, a 3D Systems, adquiriu a empresa. A patente da tecnologia SLS emitida em 28/01/1997 expirou em 28/01/2014.

¹⁴ A Stratasys é uma fabricante americana de impressoras 3D e sistemas de produção 3D para soluções de prototipagem rápida e de fabricação digital direta.

Até 2005 as impressoras eram usadas principalmente pela indústria para produção de protótipos de produtos antes de serem produzidos em grande escala e eram proibitivamente caras para a maioria dos usuários. Esse cenário começou a mudar quando o primeiro modelo de impressora 3D de baixo custo foi lançado em forma de kit para ser montado pelo usuário: o projeto *RepRap* (Replicating Rapid Prototyper)¹⁵, do Dr. Adrian Bowyer (Figura 10).

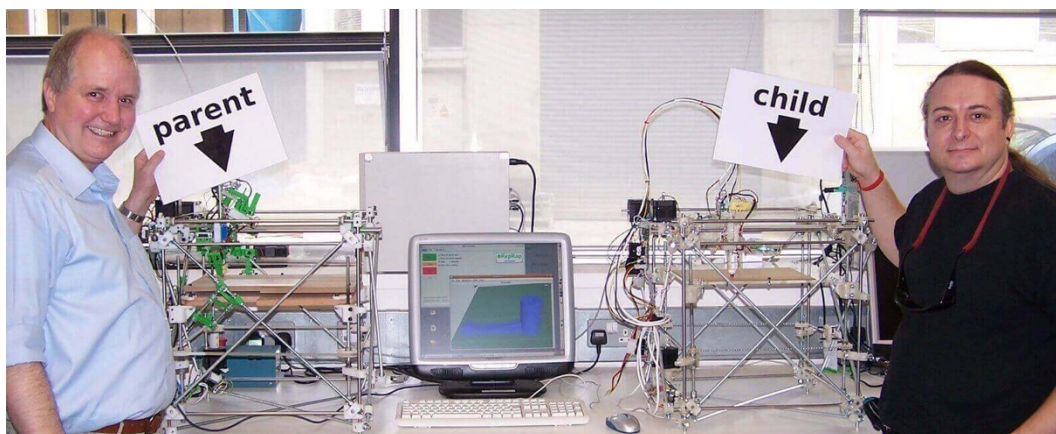


Figura 10: todas as partes plásticas da máquina à direita foram produzidas pela máquina à esquerda. Adrian Bowyer (à esquerda) e Vik Olliver (à direita) são membros do projeto RepRap. Fonte: All3dp.

Após esse lançamento, usuários ao redor do mundo tiveram o poder de criar produtos por conta própria diretamente da mesa de trabalho. Desde então, inúmeras empresas inspiradas no projeto da RepRap entraram no mercado com kits e impressoras de baixo custo para se ter em casa, disseminando a tecnologia para entusiastas e pequenas empresas. (Golberg, 2018)

Grandes redes de varejo vendem impressoras 3D em suas lojas físicas e virtuais. A confiabilidade, a facilidade e a qualidade melhoram a cada dia, possibilitando aos usuários fazer o que não conseguiam facilmente antes. Talvez esse seja um dos motivos para que grandes investimentos na tecnologia estejam ocorrendo agora. (Mccue, 2015)

Não há dúvidas que a MA está causando importantes mudanças na manufatura que vão muito além da prototipagem rápida, ferramentas, brinquedos e miudezas. A manufatura aditiva está criando produtos duráveis e seguros para

¹⁵ RepRap é um projeto de código aberto (do inglês *open source*) portanto, toda a propriedade intelectual produzida pelo projeto é liberada sob uma licença de software livre, a Licença Pública Geral GNU. Com base nesse projeto surgiram diversos projetos e empresas de impressora 3D. Disponível em: <<http://reprap.org/wiki/RepRapGPLLicence>>. Acesso em: 17 set. 2018

venda a clientes reais em pequenas e grandes quantidades. (D'aveni, 2015) Até mesmo Terry Wohlers¹⁶, impressionou-se:

Estamos vendo um nível de investimento em impressão 3D que não vimos no passado - nem perto disso[...] é realmente muito interessante e, até certo ponto, incompreensível, especialmente considerando que a impressão 3D existe há mais de 25 anos. (D'AVENI, 2015)

O histórico da MA mostra que essa tecnologia ainda está se desenvolvendo, com novos materiais e impressoras sendo lançadas frequentemente. Usuários não estão limitados somente ao plástico. A impressão pode ser realizada diretamente em diversos materiais como ouro ou prata. Há inúmeros avanços ocorrendo em algum lugar do mundo, sendo difícil se manter atualizado sobre as evoluções da tecnologia que ocorrem dia após dia. Evidenciando o funcionamento dessa tecnologia Campbell et al. afirma:

Designs, e não produtos, mover-se-iam ao redor do mundo como arquivos digitais a serem impressos em qualquer lugar por qualquer impressora que possa alcançar os parâmetros do projeto. Primeiro a Internet eliminou a distância como um fator para mover a informação e agora a manufatura aditiva elimina-a para o mundo material. Assim como um documento escrito pode ser enviado como um PDF e impresso em 2D, um arquivo de design STL pode ser enviado instantaneamente para o outro lado do planeta através da internet e impresso em 3D. (CAMPBELL et al., 2011)

2.2 Processos das tecnologias de MA

Selecionar o processo de impressão ideal para um projeto pode ser difícil sem um conhecimento das tecnologias. A diversidade de tecnologias, bem como de materiais, demonstra suas adequações, com variações de propriedades como precisão dimensional, acabamento de superfície e requisitos de pós-processamento. Uma forma simples de classificar os processos é por estado ou forma inicial do material utilizado. Com esse pensamento, os processos podem ser separados por líquido e pó. Porém, essa forma de classificar não indica nenhuma informação sobre o princípio de processamento do material. Por isso foi criada a norma ISO / ASTM

¹⁶ Teddy Wohlers, é fundador da Wohlers Associates, empresa responsável pelas pesquisas mais citadas na ascensão da tecnologia de impressão 3D.

¹⁶ ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; ASTM – AMERICAN SOCIETY OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING AND MATERIALS. ISO/ASTM 52900:2015(E): standard terminology for additive manufacturing – general principles – terminology. Genève: ISO; West Conshohocken: ASTM International, 2016.

52900 em 2015 para padronizar a terminologia, e classificar cada um dos diferentes métodos de manufatura aditiva. Um total de sete categorias de processos foi estabelecido. Cada um deles e a descrição de processo associado são apresentados na tabela abaixo e descritas em detalhes a seguir (Figura 11) (Volpato et al., 2017):

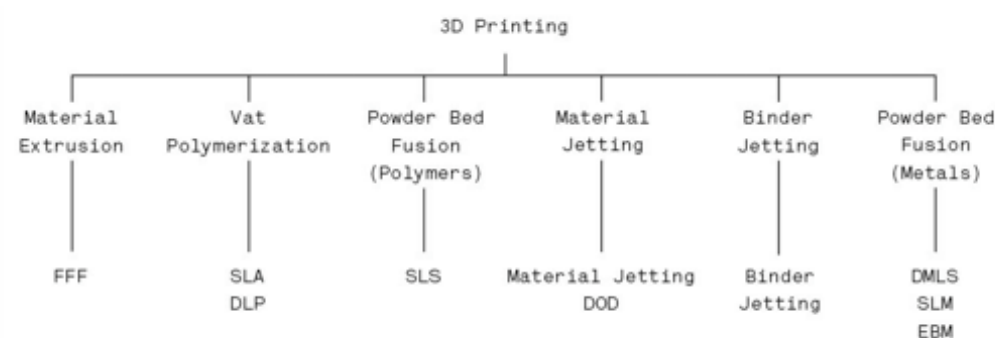


Figura 11: tabela com os processos de impressão 3D. Fonte: 3D Hubs

2.2.1 Extrusão de material (FFF – *Fused Filament Fabrication*)

Na FFF (Figura 12) o filamento é empurrado através de um bico e depositado em um caminho predeterminado pela impressora em uma bandeja, camada sobre camada, até formar o objeto. O diâmetro do furo do bico e altura de cada camada definem a resolução da peça. Essa é a tecnologia mais comum no mercado de impressoras. A maioria utiliza filamento de plástico como material principal. Vários parâmetros podem ser ajustados, tais como velocidade da extrusão e impressão, preenchimento e temperatura. Uma característica importante desse processo é o suporte, um recurso criado automaticamente pelo programa da impressora para que as camadas não sejam impressas no ar. Normalmente é treliçado e frágil para que possa ser retirado posteriormente. Impressoras 3D recentes podem ter de 1 a 4 cabeças de impressão diferentes, expandindo a capacidade de extrusão e criando novas possibilidades, como suporte solúvel e impressão com materiais e cores diferentes. (Redwood; Schoffer; Garret, 2017)

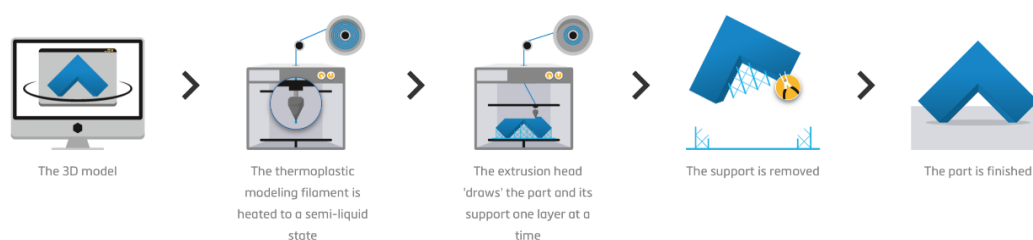


Figura 12: processo de impressão FFF Fonte: Materialise

2.2.2 Polimerização (SLA - *Stereolithography* e DLP – *Direct Light Processing*)

As tecnologias de polimerização (Figura 13) utilizam uma resina fotossensível em um tanque que cura por fonte de luz as camadas até o objeto estar completo. As formas mais comuns de polimerização são a SLA e DLP. O que difere as duas é a fonte de luz utilizada para curar a resina em cada camada. A SLA utiliza laser UV e a DLP um projetor UV. Imprimindo uma peça idêntica utilizando as duas tecnologias, a DLP será mais rápida pois com um flash consegue curar a camada inteira, enquanto o laser percorrerá todo o contorno do objeto. Os suportes também são necessários e são gerados automaticamente pelo programa da impressora e removidos posteriormente. É uma tecnologia que produz modelos com excelente qualidade de superfície em um curto período de tempo se comparado a FFF. Os parâmetros da impressora, na maioria, são fixos e não podem ser alterados. A sigla SLA ficou conhecida por ser a tecnologia de impressão que originou todas as outras. (Redwood; Schoffer; Garret, 2017)



Figura 13: Processo de impressão SLA Fonte: Materialise.

2.2.3 Sinterização seletiva a laser (SLS - *Selective Laser Sintering*)

A tecnologia SLS (Figura 14) é a mais usada em aplicações profissionais e industriais, além de ser uma das mais versáteis. A impressora utiliza uma fonte térmica para induzir a fusão entre partículas de pó em um local específico da área

da bandeja para produzir uma parte sólida. Durante a impressão é utilizado um mecanismo para aplicar e suavizar o pó enquanto a peça é construída entre as camadas, resultando em um objeto submerso em pó suportando a peça à medida que ela é construída, eliminando a necessidade de estruturas de suporte. Esta é uma das principais vantagens do SLS. Existe uma variedade de materiais, incluindo plásticos e metais, aumentando as possibilidades de escolhas para diferentes aplicações. Como vários produtos podem ser produzidos simultaneamente, o processo pode ser empregado para fabricação em escala. (Redwood; Schoffer; Garret, 2017)

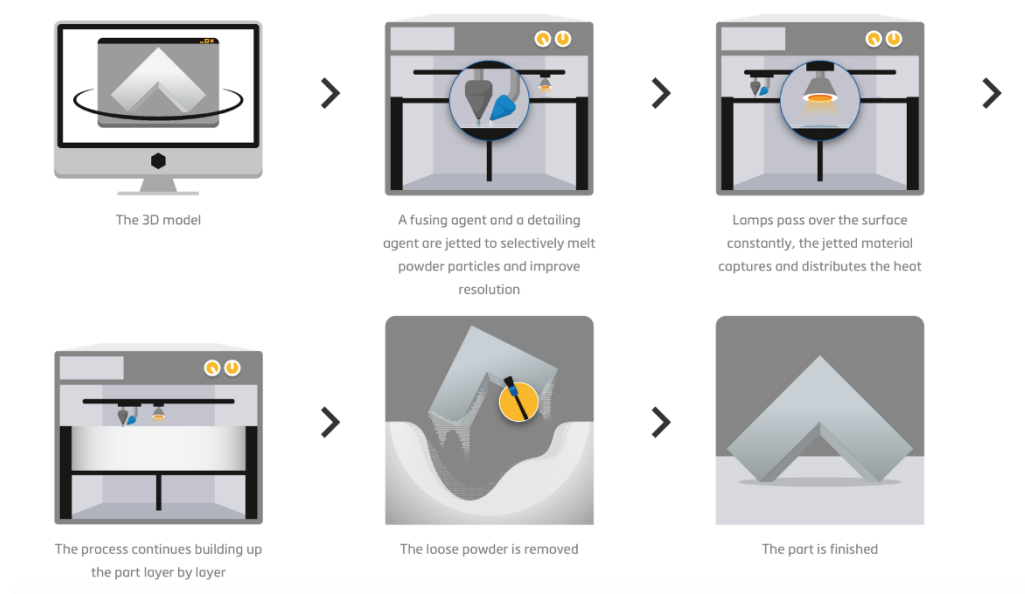


Figura 14: processo de impressão SLS. Fonte: Materialise.

2.2.4 Impressão por jato (*Material Jetting*)

Essa tecnologia (Figura 15) é um processo de impressão à jato de tinta que utiliza um cabeçote para depositar, em cada camada, uma resina fotossensível ou materiais de cera que curam quando expostos à luz UV. Depois que uma camada é depositada e curada, a plataforma desce e o processo é repetido até a forma final do objeto. Por utilizar cabeçotes é frequentemente comparado ao processo de impressão de tinta 2D. Ao contrário da maioria das tecnologias que depositam, curam ou sinterizam o material através de tecnologias de deposição pontual (um único ponto segue um caminho na camada), a impressão por jato deposita o material de forma rápida e linear sendo capaz de imprimir várias peças em uma única linha, sem afetar a velocidade de construção. É necessário suporte solúvel removido no

pós-processamento. O processo é uma das únicas tecnologias que oferecem impressão de vários materiais, além de imprimir em cores. (Redwood; Schoffer; Garret, 2017)

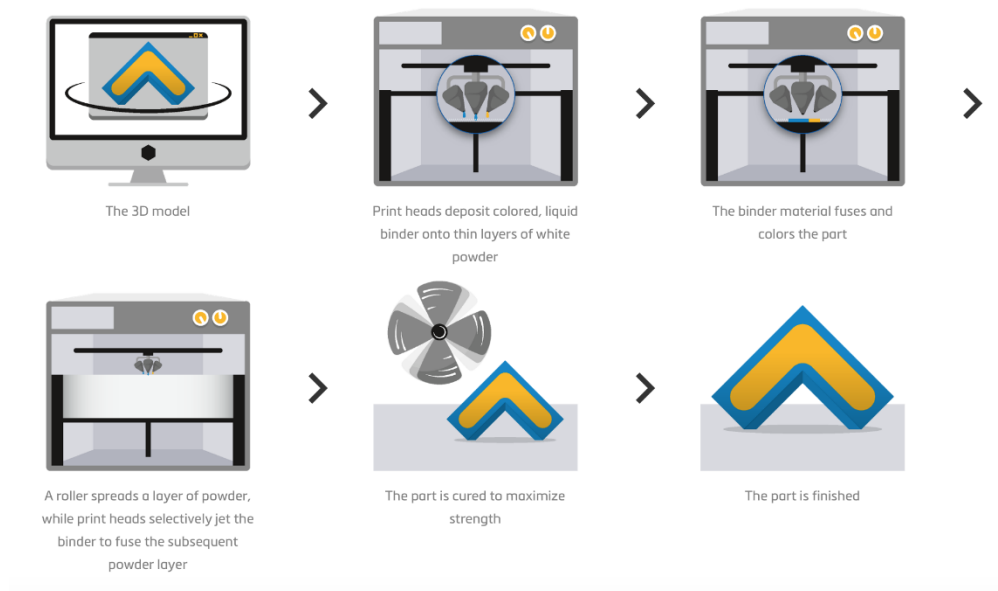


Figura 15: processo de impressão por jato. Fonte: Materialise.

2.2.5 Impressão por binder (*Binder Jetting*)

O processo de impressão por *binder*¹⁷ (Figura 16) é semelhante à SLS, com a exigência de uma camada inicial de pó na plataforma de construção. Depois é depositado o *binder* em camadas finas de pó que unem as partículas para produzir cada camada do objeto. Concluída a impressão, ele é deixado no pó para curar e ganhar força e, posteriormente removido o excesso de pó para ser retirado. Nenhuma estrutura de suporte é necessária. É possível imprimir modelos totalmente coloridos onde o *binder* é injetado primeiro, enquanto um cabeçote secundário injeta as tintas. (Redwood; Schoffer; Garret, 2017)

¹⁷ Agente ligante (cola) que une as partículas de pó.

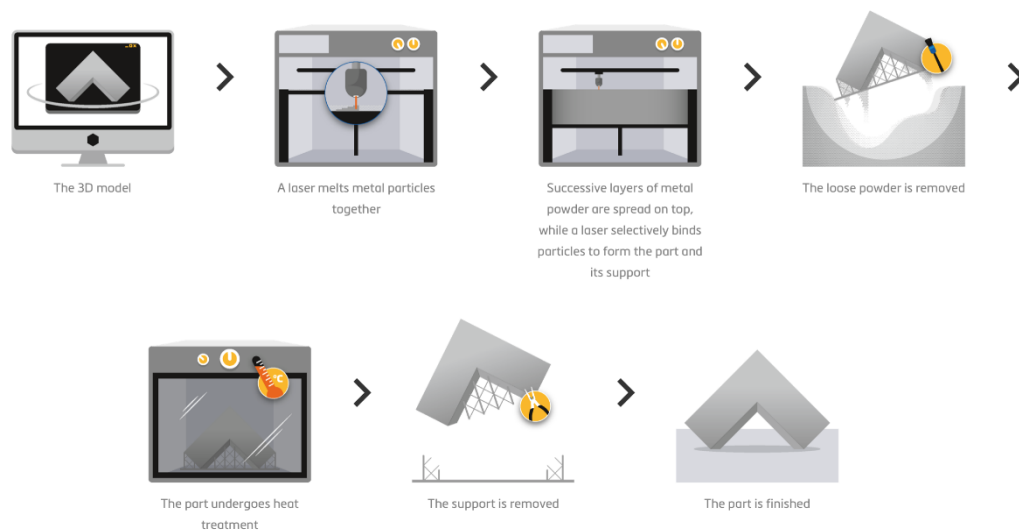


Figura 16: Processo de impressão por binder. Fonte: Materialise

2.2.6 Fusão de Cama de Pó de Metal (DMLS/SLM - *Direct metal laser sintering/Select laser melting*)

As tecnologias de Fusão de Cama de Pó de Metal (Figura 17) permitem a fabricação direta de peças em metal. As principais variações nas tecnologias vêm do uso de fontes de energia (lasers ou feixes de elétron). Todas produzem partes sólidas usando uma fonte térmica para induzir a fusão entre partículas de metal em pó, uma camada por vez. A DMLS e a SLM produzem peças por um método semelhante à SLS. A principal diferença, é que o DMLS e o SLM são empregados somente na produção de peças metálicas. O DMLS não derrete o pó, mas aquece-o até um ponto em que possa fundir-se num nível molecular. O SLM usa o laser para obter uma fusão completa do pó. Ao contrário do SLS, os processos DMLS e SLM requerem suporte estrutural para diminuir a probabilidade de qualquer distorção que possa ocorrer devido às tensões residuais produzidas durante a impressão em função das altas temperaturas. Concluída a impressão, a peça passa por um tratamento térmico para aliviar eventual tensão que possa ter ocorrido. (Redwood; Schoffer; Garret, 2017)

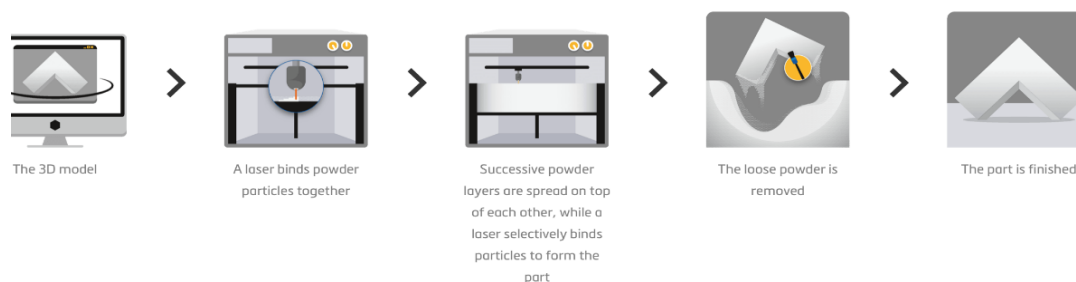


Figura 17: Processo de impressão DMLS/SLM. Fonte: Materialise.

2.3 Especificações e características

Muitas vezes a tecnologia a ser usada não é levada em consideração no desenvolvimento de um produto. É importante saber qual será o processo de fabricação no momento de realizar a modelagem tridimensional para que a chance de sucesso final seja maior. Objetos com formas complexas podem levar menos tempo de impressão que um simples cubo se forem criados com a tecnologia em mente. Com conhecimento e técnica, a MA é um processo relativamente simples e altamente automatizado (Redwood; Schoffer; Garret, 2017) (Figura 18):

1. Inicia-se com um arquivo tridimensional criado por diversos softwares de CAD (*Computer Aided Design*) disponíveis gratuitamente ou pagos;
2. No software o arquivo é exportado para um formato de impressão, geralmente o STL (*Standard Triangulation Language*);
3. Esse arquivo então é importado para o programa de fatiamento da impressora para definições dos parâmetros da impressão, tais como orientação, escala e material;
4. O software processa automaticamente o objeto, dividindo o arquivo em camadas e determinando o caminho da construção de cada uma das camadas criadas, gerando um arquivo GCODE para a impressora interpretar;
5. Com o arquivo carregado, a impressora inicia a impressão sobrepondo camada por camada até o formato final.

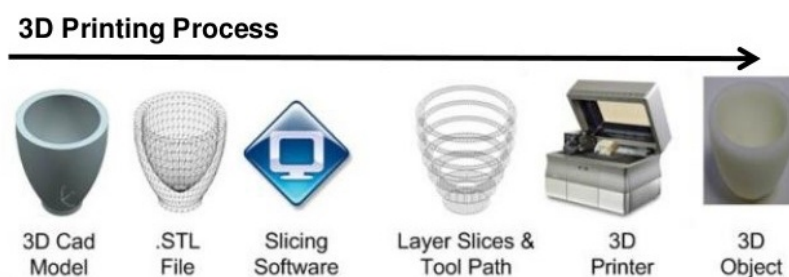


Figura 18: representação do processo de impressão 3D. Fonte: Google

O passo 4, de transformação do objeto em uma linguagem que a impressora possa compreender, é chamado de fatiamento (Figura 19). O software de fatiamento (do inglês *slicer*) atua essencialmente como intermediário entre o modelo 3D virtual e a impressora, gerando um arquivo em código G ou GCODE. O código G é uma linguagem de programação de controle numérico amplamente usada. Quando a impressão inicia, a impressora 3D segue as instruções do GCODE para construir as camadas do objeto conforme programado. Existem diversos softwares de fatiamento, gratuitos ou pagos, eles exploram diferentes recursos para atrair os usuários. (All3dp, 2019)

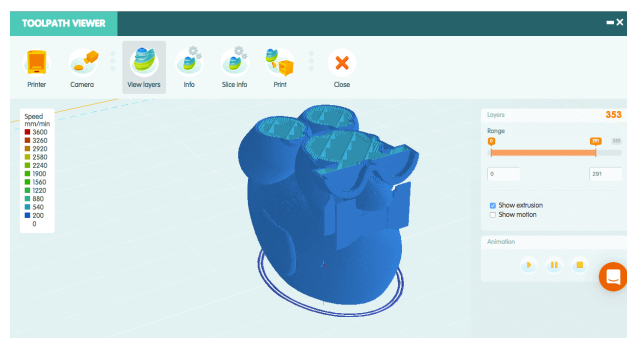


Figura 19: representação de um objeto fatiado. Fonte: ALL3DP

Até o momento, quase todas as impressoras 3D são conhecidas por serem uma caixa com vários eixos se mexendo e um objeto sendo construído camada sobre camada. Novas tecnologias estão surgindo, como robôs que imprimem e impressoras sem área de impressão definida, mas a maioria possui uma característica comum ao processo: as camadas. A espessura dessas camadas é chamada de qualidade da impressão (Figura 20). Quanto menor a espessura maior a qualidade obtida e, em contrapartida, será maior o tempo de impressão, motivos pelos quais a maioria das impressoras só imprime pequenos objetos. (Redwood; Schoffer; Garret, 2017)



Figura 20: diferentes espessuras de camadas usando a tecnologia FFF. Fonte: All3dp

As impressoras podem imprimir peças com ângulos de até 45° sem suporte. Para ângulos acima de 45°, a peça sofre um efeito de queda e por isso é necessária a utilização dos suportes (Figura 21), para que a superfície inclinada não sofra com deformações. As estruturas de suporte são geradas pelo programa de fatiamento e usadas nas regiões essenciais para serem removidos posteriormente. Cada *software* possui um método próprio para gerar o padrão, mas geralmente são fáceis de serem retirados manualmente. A desvantagem do suporte é um efeito prejudicial na superfície que está em contato, resultando em um acabamento mais áspero. Esse é um fator a ser considerado ao orientar a peça na plataforma de impressão. (Redwood; Schoffer; Garret, 2017)

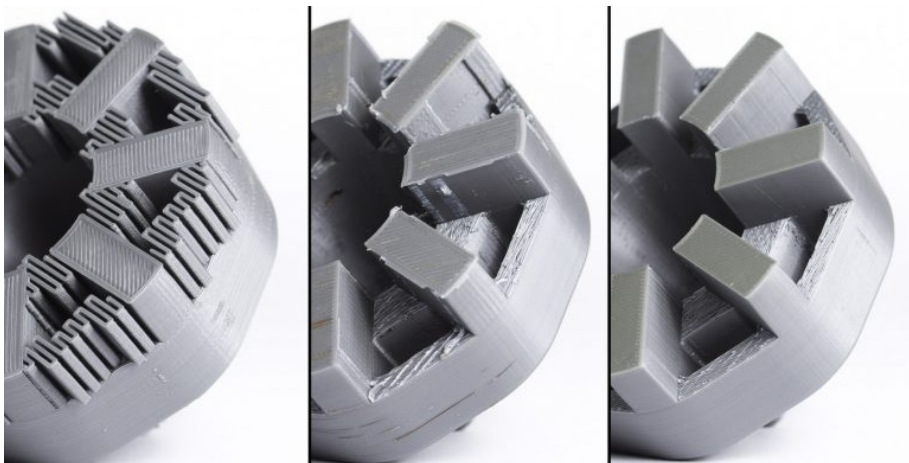


Figura 21: representação do suporte na peça, depois retirado e pós-processado. Fonte: 3DHubs

Para facilitar a decisão se uma peça vai necessitar ou não de suporte foi criada a regra "YHT" para ajudar a visualizar quais os tipos de recursos serão impressos com sucesso ou não (Figura 22). A letra Y pode ser impressa facilmente sem suporte. A letra H é um pouco mais complexa, mas se a ponte central estiver abaixo de 5mm, poderá ser impressa sem suporte e, se tiver mais de 5mm, o suporte será necessário. A letra T requer suporte para os braços. (Cain, 2018)¹⁸

¹⁸ CAIN, Perry. Supports in 3D Printing: A technology overview. Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview>>. Acesso em: 18 set. 2018.



Figura 22: representação do método YHT. Fonte: All3dp

Outra característica importante a ser considerada é a tolerância (Figura 23) que é a distância entre dois objetos antes de se fundirem. Ela é difícil de se determinar sem uma experiência com a impressora usada, pois é variável em cada uma. É um recurso muito utilizado para a criação de objetos complexos com mais de uma parte em uma única peça. (Redwood; Schoffer; Garret, 2017)

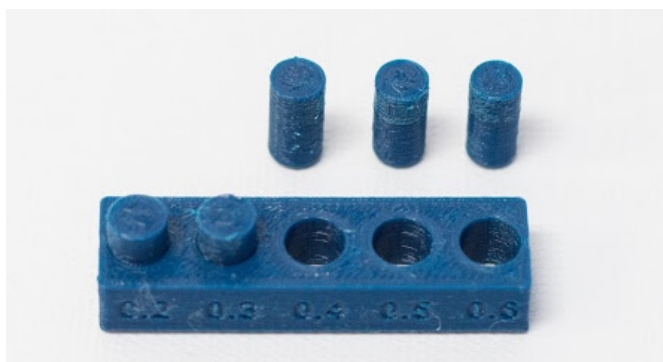


Figura 23: representação da tolerância. Fonte: All3dp

As peças geralmente não são impressas sólidas para economizar material e diminuir o tempo de construção e sim com uma estrutura interna variável de baixa densidade conhecida como preenchimento (Figura 24). A porcentagem de preenchimento é um parâmetro variável com base na aplicação de uma peça sendo 100% sólido e 0% oco. A geometria do preenchimento também pode ser modificada entre os diferentes padrões disponíveis e afeta o desempenho de uma peça. Alguns programas de fatiamento permitem que a densidade e a geometria do preenchimento variem ao longo de uma impressão. (Redwood; Schoffer; Garret, 2017)

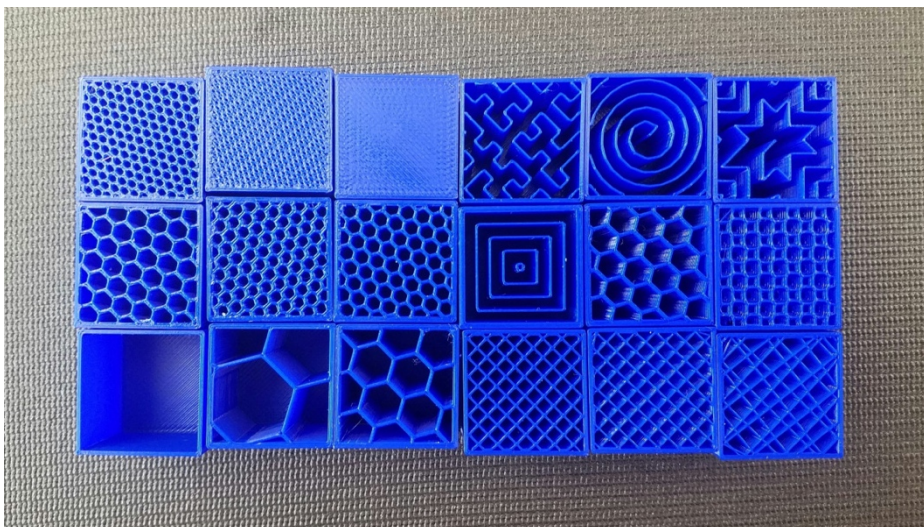


Figura 24: representação dos tipos e percentagens do preenchimento. Fonte: All3dp

2.3.1 Materiais

A primeira questão a ser considerada quando se está explorando a MA é saber qual o material a ser utilizado e quais são suas propriedades. Embora muitos materiais sejam parecidos, as diferenças na formulação e na fabricação podem afetar as características do produto e causar um grande impacto na funcionalidade e na estética. A distribuição do tamanho da partícula de um pó, por exemplo, afeta a resistência e a textura da superfície em um componente sinterizado a laser, enquanto a proporção de catalisadores de cura UV afetam a tenacidade e a rigidez em componentes de estereolitografia. (HOPKINSON; HAGUE; DICKENS, 2006)

Novos materiais, tais como os filamentos compósitos (matriz ou fase dispersa mais carga ou partículas como pó de carbono, alumínio, grafite e vidro, por exemplo), estão sendo lançados com rapidez, apesar de nem sempre as peças serem impressas com perfeição devido as restrições exigidas no processo. Para encontrar o melhor material para a aplicação desejada é preciso conhecer suas propriedades, características e como utilizá-lo, pois diferentes materiais exigem diferentes recursos da impressora e muita experimentação. As grandes capacidades de customização das tecnologias de impressão permitem novas criações de acordo com o surgimento de necessidades, ganhando confiabilidade e popularidade entre o público. Assim como os processos de impressão 3D, os materiais também podem ser simplificados e separados em duas grandes categorias: polímeros e metais.

“Polímeros, como os plásticos, possuem três formas diferentes, filamento, resina e pó (Figura 25), e sua diversidade de propriedades os faz serem usados para uma ampla gama de aplicações. Polímeros são encontrados em tudo, desde adesivos a dispositivos biomédicos. Hoje a indústria de polímeros é maior que as indústrias de aço, alumínio e cobre combinadas.” (HOPKINSON; HAGUE; DICKENS, 2006)



Figura 25: as três formas de material encontradas, filamento, resina e pó. Fonte: Formlabs

A MA em metal utiliza quase exclusivamente pós (Figura 26), permitindo que peças de alta qualidade e funcionais sejam produzidas a partir de uma variedade de pós metálicos. A distribuição do tamanho de partícula, a forma e a fluidez (as forças coletivas que atuam sobre partículas individuais à medida que fluem) são propriedades importantes que determinam a adequação de um pó de metal para a impressão 3D. (Hopkinson; Hague; Dickens, 2006)



Figura 26: pó de metal sendo retirado da peça impressa. Fonte: Protolabs

Diversos estudos estão em curso para adequar os materiais usados na indústria tradicional à manufatura aditiva. As propriedades que carregam são importantes para criação de novas possibilidades de utilização na tecnologia aditiva. Muitos

materiais surgem da experimentação e necessidade específica dos usuários que, na busca por adequação, acabam desenvolvendo novas tecnologias de impressão baseadas nos processos existentes, como é o caso do vidro criada pela pesquisadora do MIT Neri Oxman¹⁹ (Figura 27).

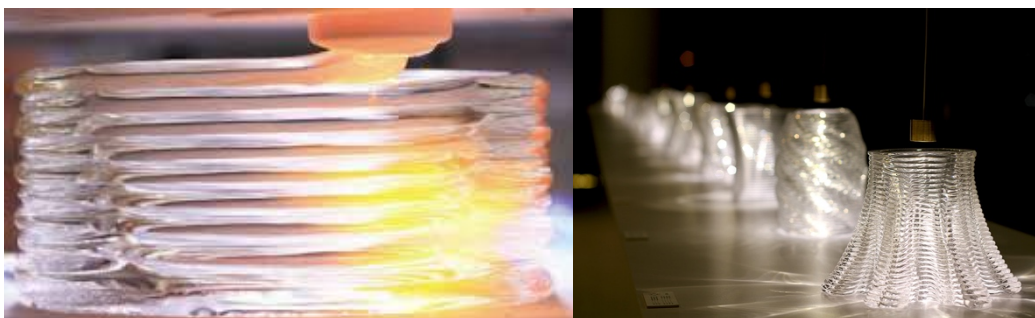


Figura 27: o projeto, intitulado G3DP, representa o primeiro desse tipo de processo de impressão de vidro opticamente transparente. Fonte: MIT Media LAB.

2.3.2 Pós-impressão

Apesar de todas as vantagens que a MA traz, a maioria das tecnologias ainda requer um pós-processamento (Figura 28), acrescentando uma etapa ao processo como um todo. Para algumas tecnologias, a remoção da impressão é tão simples quanto separar a peça da plataforma. Para outras, a remoção é um processo técnico que envolve a extração precisa da peça enquanto ainda está envolvida no material de suporte ou presa à bandeja, exigindo mão de obra qualificada com equipamentos de segurança e ambientes controlados. (Volpato et al., 2017)

Os procedimentos de pós-processamento (Figura 28) podem passar por cura UV, remoção de suporte, limpeza, finalização, reforço da resistência mecânica da peça e acabamento, variando de acordo com a tecnologia usada. Um objeto não está pronto para o mercado logo após ser impresso e talvez esse seja um dos maiores problemas para a indústria que ainda não está preparada e não sabe lidar com as técnicas aditivas. Mas, mesmo assim, esses pós-tratamentos, dependendo do caso, são vantajosos no processo de desenvolvimento e produção de um produto.

¹⁹ Neri Oxman é arquiteta, designer e professora no MIT Media Lab onde criou o grupo Mediated Matter, responsável pelo desenvolvimento da técnica para impressão em vidro.



Figura 28: impressões pós-processadas: solda a frio, preenchimento de lacunas, não processada, lixada, polida, pintada e revestida com epóxi. Fonte: Markforged.

2.3.3 Vantagens

Uma das principais vantagens da MA é a sua capacidade de produzir peças únicos e em baixa quantidade. Isto pode ser muito valioso para usuários que precisam de exclusividade, como na odontologia, na qual cada paciente demanda uma solução única (Figura 29).



Figura 29: a impressão 3D e escaneamento aplicada a odontologia. Fonte: Formlabs

Outra grande vantagem é a liberdade geométrica. Formas normalmente impossíveis de serem fabricadas por processos tradicionais passaram a ser fabricáveis graças à manufatura aditiva, abrindo uma série de oportunidades em termos de projeto como, por exemplo, otimizar o produto para a máxima resistência e o mínimo de peso, evitando o desperdício de material (Figura30). Além dessas

vantagens, a impressão 3D não precisa de dispositivos de fixação. Geralmente as peças são fixadas nas bandejas de construção por materiais depositados pela própria tecnologia. Também não é necessária a troca de ferramentas durante a impressão.

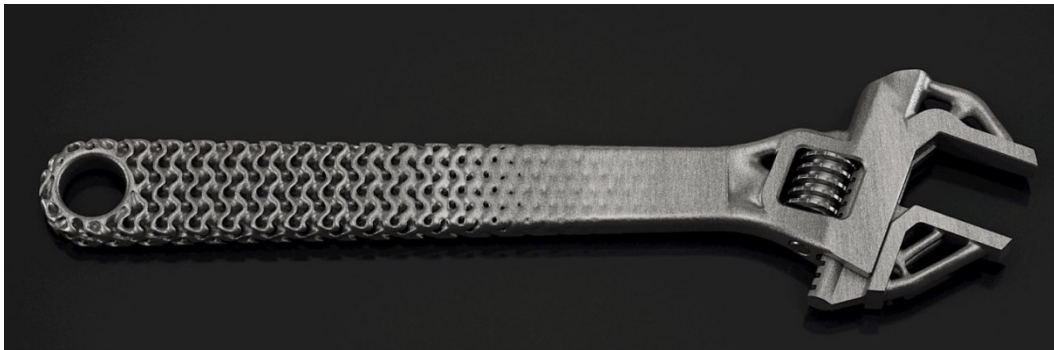


Figura 30: chave inglesa impressa em metal. Fonte: Frustum

Algumas tecnologias têm o potencial de misturar materiais diferentes (Figura 31) ou mesmo mudar a densidade do material durante a impressão, o que permite criar peças com gradação funcional, variando as propriedades mecânicas (resistência, dureza, porosidade, flexibilidade). Isso tem aberto novos campos de aplicações até então inimagináveis.



Figura 31: objeto impresso em diferentes materiais e cores. Fonte: Stratasys

À medida que as impressoras 3D avançam para produzir peças de alta qualidade e com altos níveis de confiabilidade, também vão ganhando popularidade e são adotadas com maior facilidade por indivíduos e pela indústria.

2.3.4 Limitações

A tecnologia de impressão 3D, apesar de todas as suas vantagens e potencial de aplicações, possui limitações. Dentre elas estão a incapacidade de produzir peças com a precisão e acabamento superficial. As peças geralmente apresentam pequenas deformações, e para a produção de grande volume as técnicas de fabricação convencionais subtrativas ou formativas ainda são as preferidas, além de serem mais rápidas e baratas. Isso ocorre pelo fato de a fabricação ser por adição de camadas, pois o material possui, em geral, propriedades anisotrópicas²⁰ (Figura 32), resultando em peças mais fracas em uma direção ou não totalmente densas. Dessa forma é importante que o usuário compreenda o processo e conheça a técnica a ser aplicada no produto para alcançar seus objetivos de projeto.



Figura 32: demonstração da mesma peça impressa em SLA e FFF para mostra que a tecnologia pode interferir no objetivo pretendido com a peça. Fonte: Formlabs

Embora os custos diretos de produção de bens com a MA e materiais sejam frequentemente mais altos, a maior flexibilidade proporcionada por ela significa que os custos totais podem ser substancialmente menores, com produtos otimizados capazes de manter ou melhorar sua estrutura se comparado a fabricação tradicional.

Uma das maiores desvantagens é com relação aos materiais. A maioria das tecnologias possui limitações quanto à sua escolha, dependendo da impressora. Muitas vezes estes pertencem à empresa fabricante, atrelando o usuário aos seus produtos e altos preços.

²⁰ Anisotrópico significa que certas propriedades físicas (dureza, resistência mecânica, refração da luz, por exemplo) dependem da direção em que são medidas.

2.4 Conclusões

Neste capítulo foi introduzido o conceito da manufatura aditiva como um processo de fabricação baseado na adição de camadas sucessivas de material. Seu surgimento é considerado um marco para a manufatura com grande impacto em vários setores, tais como medicina, arte, aeroespacial e odontológico. Inicialmente a intenção era fabricar apenas protótipos sem muitas exigências em termos de materiais, precisão dimensional e desempenho, fato que por si só revolucionou o desenvolvimento de produtos. Segundo Vinck:

O protótipo ocupa uma posição central no projeto quando o conhecimento do produto não pode ser nem formalizado nem estabilizado. A fabricação de um protótipo remete então à possibilidade de um teste. O protótipo representa a possibilidade de testar a ideia. A fabricação do protótipo é, muitas vezes, também a atividade no curso da qual surge a ideia. Os testes são momentos fundamentais no processo do projeto: qualificação e validação de soluções, produção de conhecimentos sobre os fenômenos e os produtos, avaliação do processo de fabricação. (VINCK, 2013)

Porém, de protótipos a peças finais, estas e outras aplicações passaram a exigir mais dos processos em termos de melhoria da qualidade de impressão e dos materiais. Com o crescimento e avanço das tecnologias, plásticos além do ABS²¹ e do PLA²², os mais utilizados e conhecidos, estão sendo lançados, tais como madeira, bronze, carbono ou vidro (Figura 33), para atender as novas demandas. O conhecimento e a utilização de cada processo, somados aos novos materiais, possibilitam ao usuário desenvolver produtos únicos com propriedades específicas para a função destinada.



Figura 33: amostra de impressões 3D usando filamentos compósitos. Fonte: Formfutura

²¹ ABS (*Acrylonitrile butadiene styrene*) é um dos filamentos mais populares da impressão 3D. É forte, maleável, resistente ao desgaste e tolerante ao calor.

²² PLA (*Polylactic Acid*) é fácil de imprimir, barato, renovável e o mais importante, biodegradável.

Desde o momento em que as empresas atuantes entraram no mercado da manufatura aditiva, seu crescimento tem sido exponencial, apesar de ainda não estamos no ápice de todas as possibilidades e capacidades das impressoras. Com o desenvolvimento tecnológico, cada evolução irá compor as capacidades das outras possibilitando inovações reais em todas elas, e principalmente na manufatura.

Capítulo III – Designing para manufatura aditiva

Quando pensamos em design como um substantivo, muitas vezes o associamos a objetos físicos - especialmente com relação a aparência e o desempenho. Mas pensando em design como verbo, a palavra assume movimento e propósito: imaginar, planejar, construir, melhorar. À medida também que nos movemos de substantivo para verbo, nos movemos de objetos para objetivos, e isso abre uma gama de novas possibilidades. O foco na ação do design também revela a gama de pessoas engajadas em sua prática: arquitetos, engenheiros, designers de produtos, criadores de videogames, empreiteiros, programadores, cineastas, etc.[...] no momento, pressões econômicas, crises globais e ameaças ambientais criaram uma necessidade maciça e urgente de soluções inovadoras. (WUJEC et al., 2011)

À medida que a manufatura aditiva avança, o ato de projetar e o design se transformam, em virtude disso, os usuários podem criar usando novas técnicas e ferramentas, alavancando o poder da sua capacidade criativa. Ken Robinson²³ em seu livro *Libertando o Poder Criativo*, explica a importância da criatividade:

Eu sempre sinto que é relevante primeiro oferecer definições de imaginação, criatividade e inovação. Para mim, a capacidade fundamental é a imaginação. É de onde tudo vem - a capacidade de levar a mente coisas que não estão presentes em nossos sentidos, de sair do ambiente sensorial imediato e formar imagens na consciência de outros lugares, outras possibilidades. Esse pode ser o dom fundamental da consciência humana. Criatividade é um tipo de processo muito prático. É o processo de ter ideias originais que tenham valor. Inovação é colocar em prática ideias originais, testá-las, testá-las e aplicá-las. Eu penso em inovação como criatividade aplicada. Essas três ideias são realmente contínuas. E design, na forma como é comumente chamado, é uma aplicação muito rígida. Eu penso em design como um subconjunto de criatividade. (ROBINSON, 2001)

O Design sempre foi conhecido como um modo de resolver problemas, descobrir oportunidades, criar novos objetos e experiências. A forma sempre foi erroneamente identificada como sendo o próprio design. Por isso, objetos que utilizam a MA estão sendo considerados tão inovadores. Não se conseguia produzir peças com forma e função tão complexas como está ocorrendo (Figura 34). Embora a liberdade de design seja um dos pontos fortes, seu desenvolvimento requer regras específicas que devem ser seguidas. A falta de conhecimento pode ser o motivo mais comum para objetos não serem impressos com sucesso. Pensar na tecnologia a ser usada, pode diminuir os custos, eliminar o tempo de montagem, melhorar a funcionalidade ou a estética e garantir o êxito na impressão.

²³ Ken Robinson, PhD, é professor emérito de Educação na Universidade de Warwick, Reino Unido.

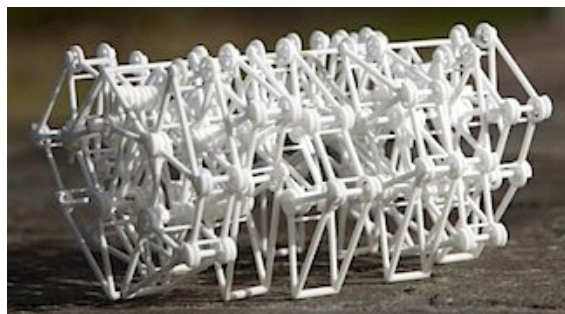


Figura 34: Animaris Geneticus Parvus, do artista Theo Jansen é o objeto mais difícil impresso pelo site de serviços de impressão Shapeways. Fonte: Shapeways.

As ferramentas digitais estão realmente possibilitando que mais pessoas consigam projetar seu próprio produto. Aqueles que nem se consideravam criadores, hoje conseguem montar impressoras, modelar digitalmente, fabricar robôs e programar²⁴. As ideias podem ser vistas, analisadas, experimentadas e prototipadas (imaginando novas e melhores possibilidades mudando sua própria natureza e o alcance do design). Ratificando:

A atividade de desenvolvimento de um novo produto não é tarefa simples. [...] Esse casamento entre ciências sociais, tecnologia e arte aplicada nunca é uma tarefa fácil, mas a necessidade de inovação exige que ela seja tentada.” (BAXTER, 1998)

3.1 Representação geométrica 3D

Produzir um modelo digital é o primeiro passo no processo de impressão 3D e também o principal obstáculo para quem quer criar seus próprios arquivos tridimensionais (Figura 35). Os softwares ampliam significativamente as capacidades humanas, mas podem ser intimidadores no começo, pela variedade de programas disponíveis e conhecimento específico aplicado.



Figura 35: mesa de trabalho com as tecnologias a disposição. Fonte: Formlabs.

Figura 36: exemplo de uma simulação rodada no software Netfabb. Fonte: Netfabb

²⁴ Programação é o processo de escrita, teste e manutenção de um programa de computador.

O método mais comum para produzir um modelo digital é o CAD. Mas a digitalização 3D também pode ser utilizada para gerar um modelo digital por meio de engenharia reversa.

Os modelos tridimensionais podem ser testados digitalmente para ajudar a entender e visualizar os complexos fenômenos termomecânicos que ocorrem durante a fabricação (Figura 36). Uma ampla gama de parâmetros pode ser simulada, como resistência à força ou temperatura, antes que um modelo físico seja criado, permitindo evitar falhas, avaliar riscos de produção, prever características e otimizar a produção para fluxo de trabalho mais rápido e mais barato. Isso é especialmente importante para componentes com alto custo em termos de utilização de materiais nobres e tempo de fabricação. (Jack Davis, 2017)

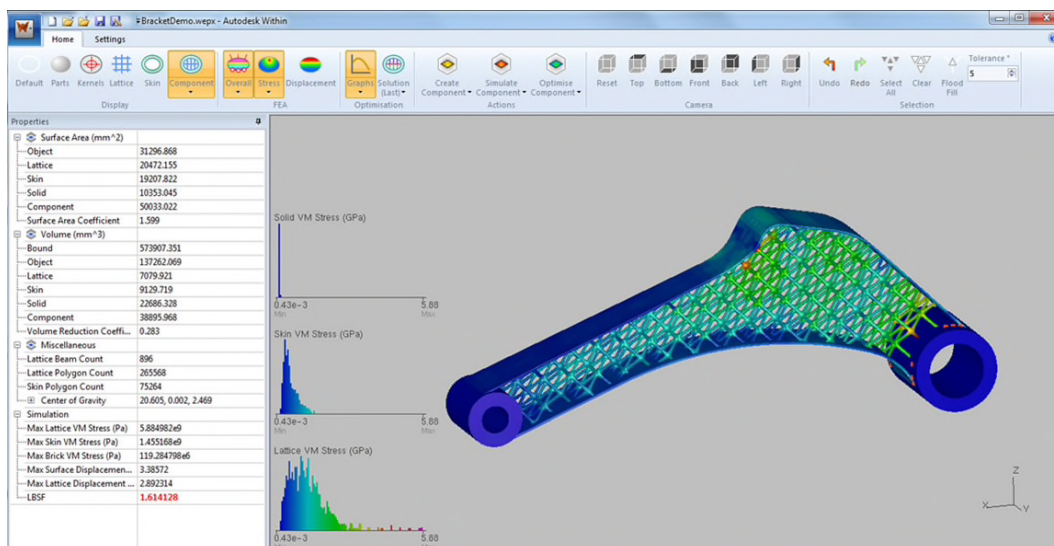


Figura 36: exemplo de uma simulação rodada no software Netfabb. Fonte: Netfabb

Os programas de CAD são relevantes no desenvolvimento da manufatura aditiva, pois é por meio deles que modelos digitais de geometrias complexas são criados. Eles foram desenvolvidos aproveitando o poder de computadores cada vez mais rápidos que somados aos avanços em energia, ciência de materiais, nanotecnologia, sensores e robótica, possibilitam o desenvolvimento e a implantação de tecnologias ainda mais avançadas. “O resultado são evoluções tecnológicas que se relacionam entre si, o progresso de uma indústria afeta diretamente o progresso da outra.” (Wujec et al., 2011)

3.1.1 Desenho auxiliado por computador (CAD) e o formato STL

Os primeiros sistemas de CAD apareceram no mercado internacional ainda na década de 1970, praticamente impulsionados pelas indústrias automotiva e aeroespacial (Hopkson; Hague; Dlickens, 2006), permitindo a geração de desenhos para a fabricação digital, produzindo modelos realistas de peças e montagens, e fornecendo novas maneiras de capturar e modelar a realidade. Os softwares podem ser divididos em três principais tipos de modelagem: sólidos, superfícies e escultura. (Jack Davis, 2017)

Modelagem de sólidos (Figura 37): permite que o usuário modifique os recursos criados. Os desenhos geralmente começam como um esboço bidimensional que é então extrudado ou revolvido para criar uma superfície tridimensional. Uma vantagem da modelagem de sólidos é sua constituição paramétrica, o que significa que alterações ou parâmetros são salvos em cada estágio do processo e podem ser editados a qualquer momento sem a necessidade de criar a peça do zero. A capacidade de montagens também é um recurso importante, permitindo que peças individuais sejam compostas, formando modelos complexos. (Jack Davis, 2017)

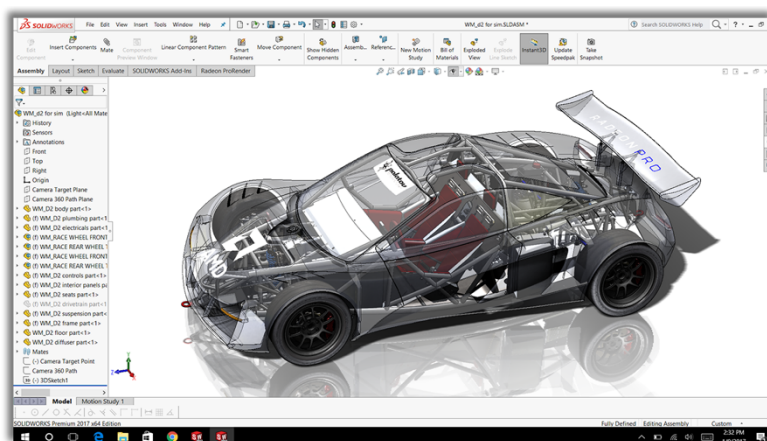


Figura 37: software Solidworks de modelagem de sólidos. Fonte: Solidworks.

Modelagem de superfície (Figura 38): é usada para modelos orgânicos, de forma livre. Uma vez que um esboço é usado para criar uma geometria, é incorporado na nova e o usuário apenas modifica a atual. São difíceis para trabalhar com modelos que exigem um alto grau de precisão e dimensionamento porque geralmente não são paramétricos. Quando a peça tiver superfícies suficientes para fechar, poderá ser preenchida e usada para impressão 3D. (Jack Davis, 2017)

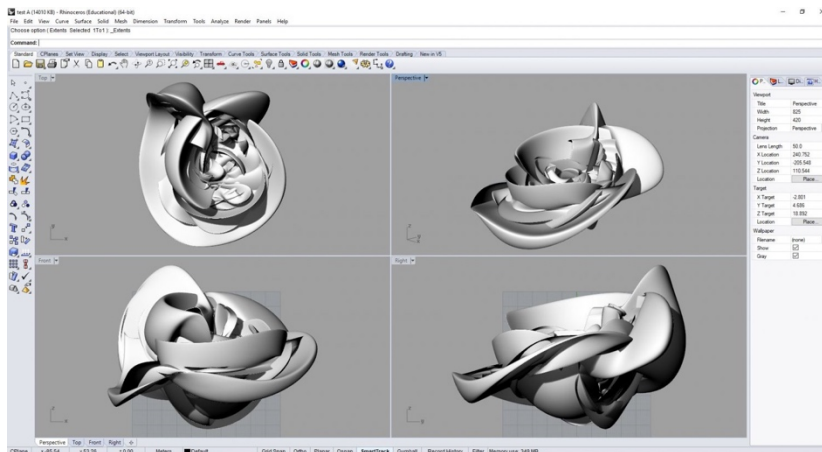


Figura 38: software Rhinoceros de modelagem de superfícies. Fonte: Rhinoceros.

Escultura (Figura 39): é usado para criar superfícies de forma livre com detalhes complexos, como personagens e jóias. Eles permitem esculpir digitalmente a partir de uma bola simulando uma argila, com pincéis que refletem ferramentas clássicas de escultura, para mover, adicionar ou remover material de um objeto. (Jack Davis, 2017)



Figura 39: software Zbrush de escultura. Fonte: Zbrush.

Cada tipo de software de modelagem tem benefícios e desvantagens, dependendo do tipo de modelo que está sendo criado. Às vezes, é necessário combinar os tipos com o que cada um tem de melhor para que os produtos possam ser funcionais e impressos.

Com a expansão e o desenvolvimento da MA os programas de CAD também tiveram que evoluir. Diversos softwares online e aplicativos para dispositivos móveis (Figura 40) foram lançados com a finalidade de facilitar o acesso de novos usuários à modelagem tridimensional sem a necessidade de um conhecimento

prévio avançado. Este movimento reflete a tendência mundial de popularização das tecnologias digitais como forma de produção individualizada, customizada e descentralizada, deslocando-se da produção em escala. (San Gustin, 2001)

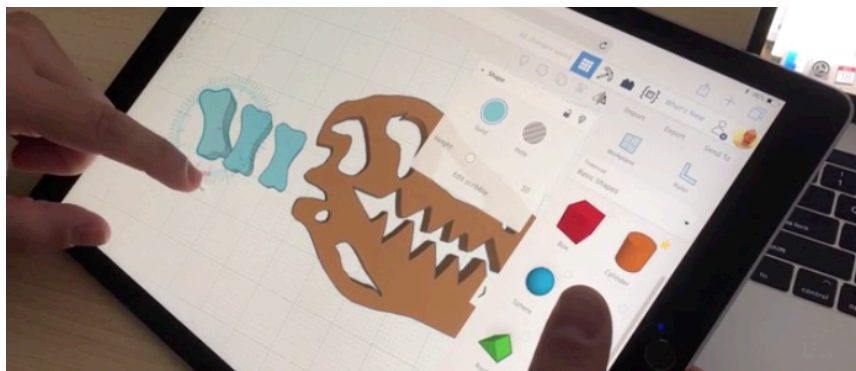


Figura 40: o software online mais popular atualmente o Thinkercad. Fonte: Thinkercad

A maioria dos novos softwares lançados têm a compatibilidade com a impressão 3D como um atrativo de recurso de fabricação. Parcerias estão sendo criadas entre empresas de software e serviço de impressão para disponibilizar não somente a compatibilidade com o processo, mas também agregar diretamente ao programa a fabricação terceirizada, estimulando a concepção dos produtos em diferentes tecnologias e materiais de modo facilitado.

Como muitos novos usuários ainda não possuem o conhecimento para modelar virtualmente, os sites para baixar modelos já existentes, como o thingiverse.com²⁵, tornaram-se uma ferramenta valiosa para buscar arquivos que podem ser personalizados, baixados, impressos e vendidos sob demanda. Sendo eles gratuitos ou pagos pessoas têm ganhado dinheiro principalmente em comunidades online que oferecem serviços de impressão 3D.

Com tantos processos de fabricação e softwares de modelagem tridimensional foi preciso criar um formato neutro para alimentar as diferentes máquinas: o STL (*Standard Triangulation Language*) (Figura 41), que é um formato de arquivo que transforma a geometria da peça em superfícies triangulares, simplificando o complexo modelo CAD e facilitando sua interpretação pelos softwares de fatiamento. A maioria dos programas são capazes de importar e exportar em STL nativamente. (Hopkinson; Hague; Dickens, 2006)

²⁵ O Thingiverse é um site onde foi criada uma comunidade de design para descobrir, fazer e compartilhar arquivos imprimíveis em 3D. É conhecida hoje como a maior comunidade de impressão 3D do mundo, acreditando que todos devem ser incentivados a criar e customizar, independentemente de sua experiência.

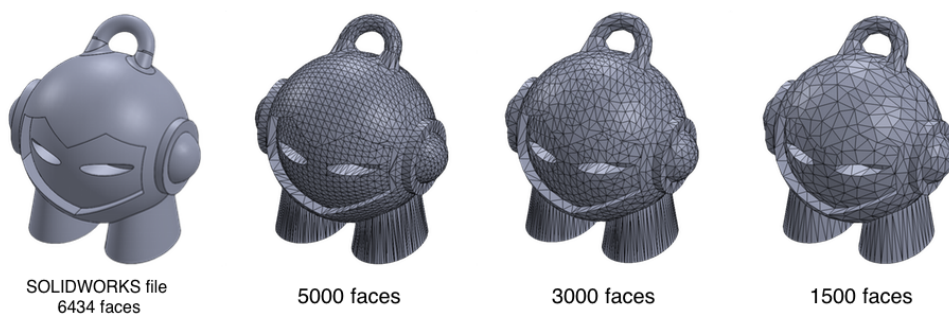


Figura 41: representação de um arquivo em CAD e em STL. Fonte: Solidworks

Apesar de popular, o STL é um formato de arquivo desatualizado. As necessidades de 1987, quando foi criado, não são as necessidades de 2019. Muitas impressoras agora são capazes de imprimir objetos coloridos ou com composições de materiais, e o STL não pode ser utilizado para esse tipo de impressão, pois não armazena dados complexos como cor, material e textura. Para tanto, existem outros formatos comumente usados como OBJ²⁶, AMF²⁷ e o 3MF²⁸. Todos possuem suas próprias forças, fraquezas e têm níveis variados de compatibilidade com os softwares. O STL é o formato predominante, o OBJ é o preferido para impressão colorida (Figura 42), enquanto formatos como AMF e 3MF estão tentando ser o novo STL. Conhecer e entender as principais diferenças entre esses formatos afeta o processo como um todo, alterando a eficiência da produção.

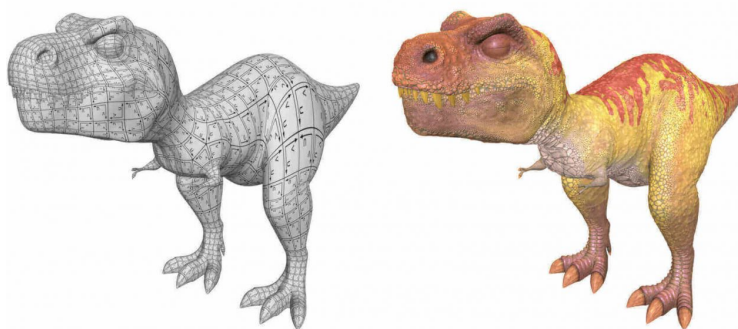


Figura 42: cores e textura no formato OBJ. Fonte: ALL3DP.

26 Os arquivos OBJ podem codificar a geometria de um modelo 3D junto com informações sobre cor, materiais e texturas.

27 O formato AMF foi criado em 2011 como um substituto para o formato de arquivo STL, com suporte para geometria, escala, cor, material, trama, duplicados e orientação.

28 Ele possui uma representação geométrica similar a STL (malhas triangulares), mas em um formato mais compacto e amigável ao tamanho do que o formato de arquivo da impressora AMF.

3.1.2 Design generativo

O design generativo replica a abordagem evolutiva do mundo natural...usando software de inteligência artificial e o poder computacional da nuvem...para fornecer milhares de soluções para um problema de projeto - inserindo parâmetros básicos como altura, peso, suporte, resistência e opções de materiais. (AKELLA, 2018)²⁹

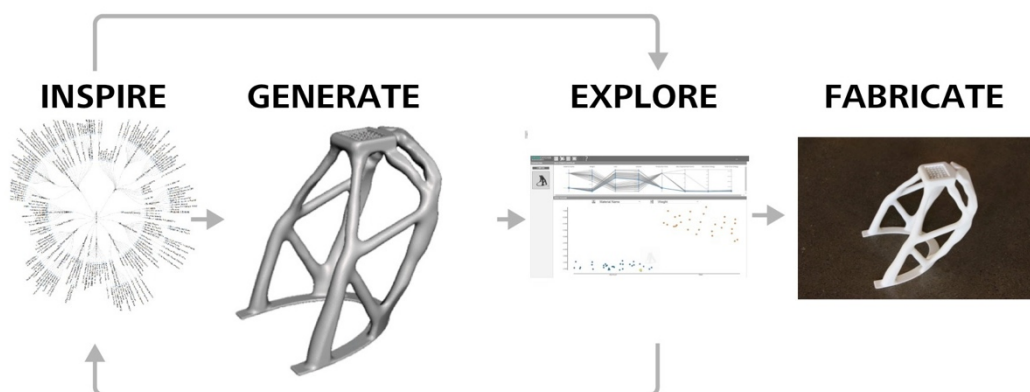


Figura 43: processo de criação utilizando o design generativo. Fonte: Autodesk.

Não existe uma definição única para o termo design generativo, mas todas possuem características semelhantes e se complementam. O que se pode afirmar é que a forma como produtos, de cadeiras a carros, estão sendo produzidos está sendo reinventado através desse processo (Figura 43). A união do senso crítico do homem, com a potência da tecnologia é a essência para criação conjunta de produtos melhores.

Algumas das empresas mais avançadas do mundo utilizam para resolver desafios e desenvolver soluções de design que sozinha a mente humana não poderia idealizar. No processo de desenvolvimento de um produto é descrito o objetivo desejável, mas não como ele deve ser feito. (Gershenfeld, 2017)

O design generativo aproveita o aprendizado da máquina para imitar a abordagem evolutiva da natureza. Ao invés de começar um desenho tridimensional baseado em ideias pré-concebidas, o usuário diz ao computador o que quer realizar ou qual problema deseja resolver, inserindo parâmetros (como materiais, tamanho, peso, resistência, métodos de manufatura e restrições de custo) no software para que sejam exploradas todas as combinações possíveis de uma solução, gerando rapidamente centenas ou até milhares de opções (Figura 44) de um objeto. Depois,

²⁹ Ravi Akella é diretor de gerenciamento de produtos para softwares de projetos generativos na Autodesk.

o homem filtra-se e seleciona os resultados que melhor atendam aos objetivos desejados. (Akella, 2018)

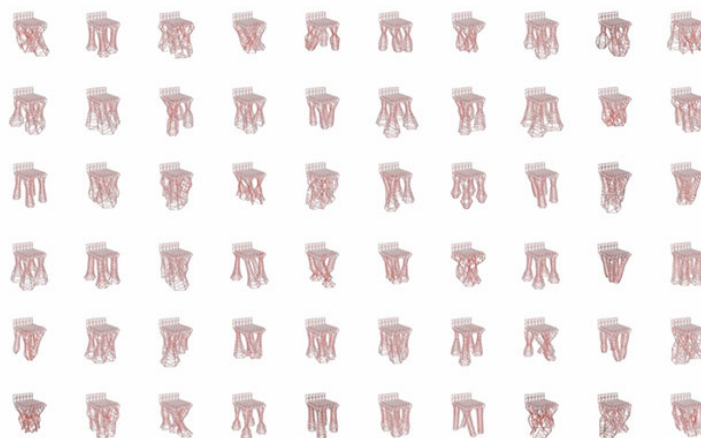


Figura 44: soluções geradas pelo software para um problema. Fonte: Autodesk.

Como acontece com qualquer nova tecnologia, muitas vezes há falta de clareza sobre as funcionalidades e diferenças com as já existentes. Otimização de topologia e de malhas paramétricas ou tecnologias similares se parecem com o design generativo, mas não são. Aquelas estão focadas em melhorar um projeto pré-existente e não criam novas possibilidades. O equívoco surge porque as entradas para o design generativo são semelhantes às entradas para as ferramentas de otimização (Figura 45). No entanto, ele gera produtos ou soluções válidas levando em consideração a manufaturabilidade ao invés de apenas uma versão otimizada do objeto. (Akella, 2018)

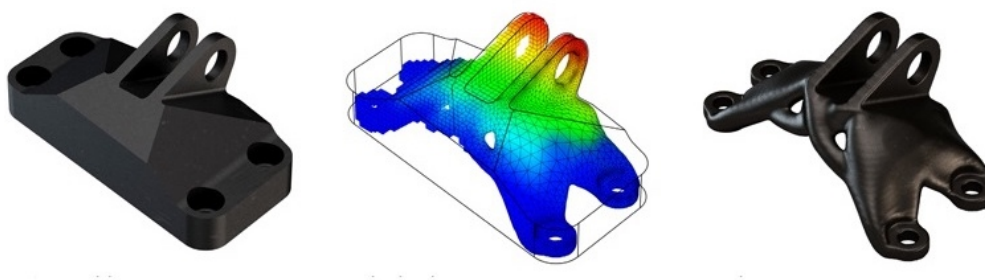


Figura 45: exemplo de otimização de topologia e não de design generativo. Fonte: Airbus

Com o design generativo a simulação é incorporada ao processo de design. É possível especificar métodos de fabricação como o aditivo, subtrativo, fundição, etc. e o software somente gera produtos que possam ser fabricados com o método

especificado. Contudo, quando combinamos o design generativo e suas formas complexas com a manufatura aditiva temos uma combinação “perfeita”. A consolidação de várias peças em um único produto simplifica as cadeias de suprimento e a manutenção reduzindo os custos gerais de fabricação e tempo, impactando muito mais do que apenas na noção tradicional do design.

3.1.3 Digitalização tridimensional

A digitalização 3D (também denominada escaneamento) permite a obtenção das superfícies externas de objetos por meio de scanners ou máquinas fotográficas. Esses equipamentos são capazes de capturar a geometria de um objeto físico, que, depois de tratada, é convertida em superfícies para serem utilizadas nos produtos. A digitalização 3D pode ser realizada por contato ou sem contato físico. (Volpato et al., 2017)

Produzir peças que fazem referência a objetos do mundo real pode ser um elemento essencial para trabalhos técnicos, desde engenharia de precisão até a arte. O escaneamento atualmente é muito utilizado para engenharia reversa (Figura 46). Esse processo é feito tanto para modificação quanto para otimização de uma peça já existente de forma digital. No mercado existem diferentes tecnologias para a digitalização que variam de acordo com sua aplicação e o seu preço: laser ou luz estruturada, fotografia digital, tomografia (ou micro tomografia) computadorizada (TC), a ressonância magnética (RM) e ultrassonografia. (Formlabs, 2018)



Figura 46: processo de escaneamento 3D, e o modelo virtual gerado. Fonte: AET LABs

As tecnologias mais difundidas utilizam o laser ou luz estruturada para captura da geometria. Na fotografia digital, o modelo 3D é reconstruído por meio de várias imagens de diferentes vistas do objeto. As únicas tecnologias capazes de captar informações internas das estruturas são as tecnologias de imagens não invasivas. Nessas, as informações da anatomia interna de um paciente ou objeto são tratadas por sistemas específicos de segmentação e reconstrução 3D. (Volpato et al., 2017)

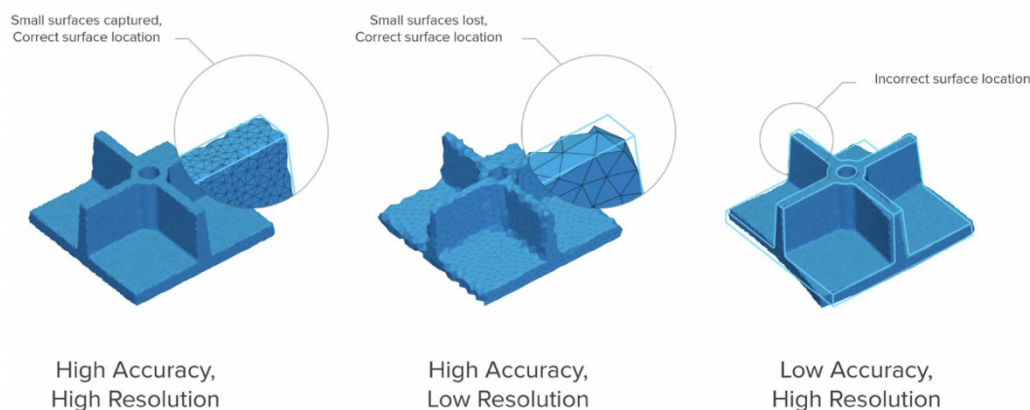


Figura 47: representação da qualidade versus resolução no escaneamento 3D. Fonte: Formlabs

Existe uma ampla variedade de *scanners* no mercado, para escolher a opção correta para cada aplicação, existem fatores importantes a serem avaliadas, tais como precisão, tolerância, cobertura e resolução (Figura 47). Abaixo segue um fluxograma comparativo da empresa Formlabs, com as características principais e para que tipo de necessidade ele é indicado (Figura 48).

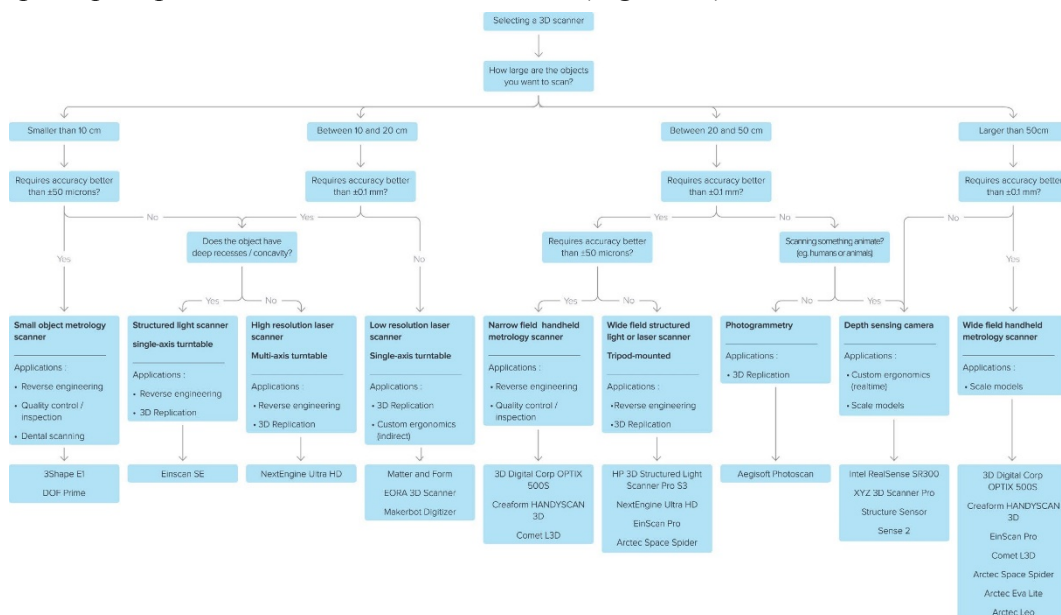


Figura 48: fluxograma dos scanners do mercado, características e aplicações. Fonte: Formlabs.

3.2 Aplicações

“Com a inovação real, surge a necessidade de prototipar” (Tony Fadell, 2017).

Produtos que utilizam a MA estão se tornando cada vez mais comuns e ganhando notoriedade na imprensa simplesmente pelo fato de terem usado essa tecnologia. Um copo impresso não é inovador, apenas foi feito de maneira diferente da usual. A inovação passa pelo desenvolvimento do projeto como um todo e é esse novo pensamento para projetar que norteia essa dissertação. Foram escolhidos deliberadamente abaixo alguns produtos que utilizaram a manufatura aditiva para inovar em sua respectiva área.

3.2.1 Moda

A impressão 3D para moda inclui tudo o que é vestível, de vestidos a sapatos e acessórios. Embora ainda não tenhamos roupas impressas em lojas de varejo, é possível ver aplicações inovadoras em desfiles e exposições, com um grande potencial de solução para personalização. Em sua maioria as peças impressas em 3D são rígidas, o que para a moda é um grande problema, contudo foram desenvolvidos materiais flexíveis e mecanismos para dar movimento a uma peça com componentes rígidos para sua aplicação nesse grande mercado. Podemos ver abaixo produtos que conseguiram alcançar seus objetivos de maneira inovadora. (All3dp, 2019)

Como é o caso da Nervous System³⁰, um estúdio de design generativo que trabalha na interseção entre ciência, arte e tecnologia. Eles criam com um processo que emprega simulação de computador para gerar produtos e a manufatura aditiva para fabricá-los. A inspiração é centrada em fenômenos naturais. Os softwares são baseados em processos e padrões encontrados na natureza para criar arte, jóias e roupas únicas.

O Kinematics Dress é composto por triângulos articulados que cobrem o corpo. As dobradiças não apenas criam uma peça de vestuário com movimento semelhante a tecido, mas também permitem dobrar a peça computacionalmente para produzir uma configuração de impressão menor e eficiente[...]. (System, 2019) (Figura 49)

³⁰ SYSTEM, Nervous. Kinematics Link. Disponível em: <<https://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/albums/kinematics-link/>>. Acesso em: 21 mar. 2019.



Figura 49: simulação do vestido para impressão 3D e o vestido impresso. Fonte: Nervous System.

A Adidas³¹ fez uma parceria com a Carbon³² para desenvolver uma entressola que atendesse as necessidades de desempenho e conforto exigidos por corredores, que resultou no Futurecraft 4D (Figura 50). A entressola é impressa em peça única em uma mistura de resina curável por UV e poliuretano, e carrega consigo movimento, amortecimento, estabilidade e conforto. (Carbon, 2018)



Figura 50: tênis Futurecraft 4D e a sola sendo impressa. Fonte: Carbon.

3.2.2 Construção civil

A manufatura aditiva não se limitou somente ao desenvolvimento de pequenos objetos, mas também a projetos de grande escala, como prédios e escritórios. Virginia San Fratello e Ronald Rael são um casal de arquitetos que estão democratizando o processo de impressão 3D na construção civil, usando materiais

³¹ A Adidas é uma empresa multinacional com sede em Herzogenaurach, na Alemanha. Produzem mais de 900 milhões de produtos esportivos com parceiros de fabricação independentes em todo o mundo.

³² A Carbon trabalha no cruzamento de *hardware*, software e ciências moleculares. Sua visão é um futuro fabricado com luz, onde peças rastreáveis de qualidade final são produzidas em escala com a tecnologia CLIP (Produção de Interface Líquida Contínua).

destinados ao lixo no lugar do *drywall* e espuma. Eles desenvolveram técnicas para construções sustentáveis utilizando materiais de baixo custo como sal, areia, barro, cascas de frutas, entre outros, e construíram uma cabana no quintal de casa na Califórnia (figura 51). Plantas suculentas brotam em toda a fachada e os azulejos são feitos de cascas de uva, serragem e cimento. (The New York Times, 2019)



Figura 51: a cabine de curiosidades impressas em 3D. Fonte: Matthew Millman.

O xeique Mohammed bin Rashid Al Maktoum, dos Emirados Árabes Unidos, anunciou em 2016 no lançamento do projeto “The Office of Future” uma estratégia do país para a MA na construção civil (Figura 52). Ele acredita que até 2030, 25% dos prédios de Dubai serão baseados na tecnologia. O projeto foi o primeiro edifício de escritórios impresso no mundo. A impressora usou uma mistura especial de cimento disposto camada por camada. Todo o processo levou apenas 17 dias e o custo foi cerca de US \$ 140.000, sem incluir os detalhes de acabamento. (All3dp, 2016)



Figura 52: The Office of Future externamente e internamente. Fonte: Dubai Future Foundation.

3.2.3 Gastronomia

A impressão 3D de comida não é tão difundida quanto em outras aplicações, mas pode permitir a reinvenção da culinária em vários níveis, da textura à forma, à

apresentação. As possibilidades são infinitas e com certeza continuarão a superar expectativas.

Dinara Kasko é uma arquiteta ucraniana que incorporou a impressão 3D na confeitaria (Figura 53). Seus trabalhos aplicam princípios matemáticos para criação sobremesas complexas com linhas arquitetônicas. A princípio é gerado um modelo com a ferramenta CAD que em seguida, é impresso e a partir do qual é produzido um molde de silicone. (Kasko, 2018)



Figura 53: processo de produção dos moldes e um bolo finalizado. Fonte: Dinara Kasko.

A Food Ink é uma experiência gourmet única, em que a comida, todos os utensílios e os móveis são totalmente produzidos através de impressão 3D em um espaço futurístico imersivo (Figura 54). É um jantar conceitual no qual a cozinha se encontra com a arte, a filosofia e a tecnologia. Assim como a gastronomia envolve mais do que comida, a visão da empresa vai além da tecnologia. “É sobre o melhor do que o passado tem para nos ensinar, a fim de aproveitar ao máximo as possibilidades que temos diante de nós.” (Food Ink, 2017)

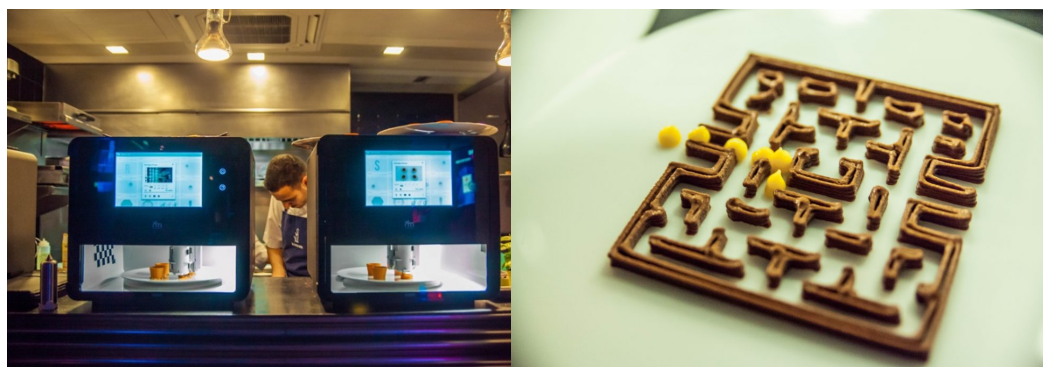


Figura 54: impressoras usadas pelo Food Ink e um prato finalizado. Fonte: Food Ink.

3.2.4 Medicina

A MA está trazendo inovações para o campo da medicina que vão além da prática e pesquisas médicas. É possível oferecer soluções personalizadas para cada paciente, preparação de cirurgias, próteses, fabricação de ferramentas e dispositivos médicos e, mais recentemente, a impressão biológica (do inglês *Bioprinting*)³³ de tecidos e órgãos. Essas inovações estão salvando vidas, e fazendo história.

O projeto EXO de William Root demonstra perfeitamente como as próteses impressas (Figura 55) podem ser funcionais e bonitas. Usando digitalização, impressão e modelagem 3D, Root automatizou o processo de fabricação. O membro é modelado para corresponder exatamente ao remanescente com um padrão personalizável, oferecendo uma alternativa leve e ao mesmo tempo esteticamente atraente.

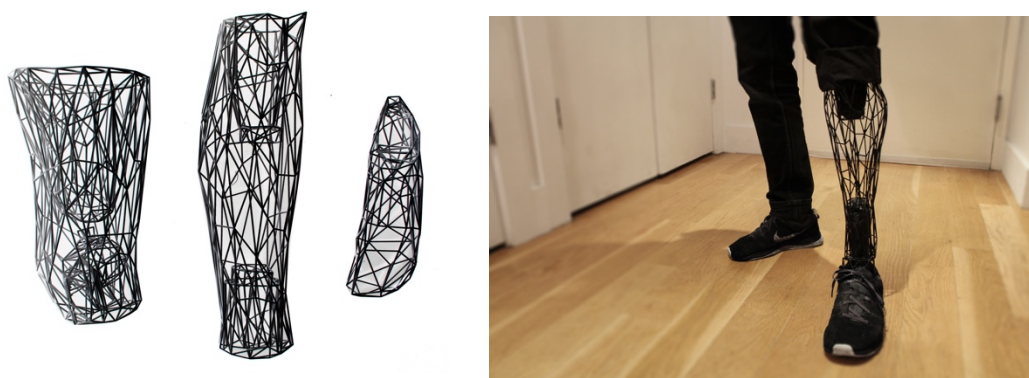


Figura 55: A prótese criada do projeto e em utilização. Fonte: Binance

Os primeiros registros de tentativas de representação gráfica do feto datam de 1500 [...]O crescente desenvolvimento tecnológico na obtenção e visualização de imagens através de tecnologias não invasivas trouxe grande avanço na medicina, especialmente do feto. (LOPES et al., 2013)

O projeto Feto 3D é revolucionário, pois utilizou um modelo tridimensional da mãe obtido pelo *body scanner* 3D, e um modelo do bebê obtido através de ressonância magnética. Os dois arquivos foram unidos e impressos, gerando um modelo transparente (Figura 56) no qual é possível visualizar o feto no interior do útero da mãe. (Lopes et al., 2013)

³³ *Bioprinting* é um processo de manufatura aditiva onde biomateriais, como células, são combinados para criar tecidos com estruturas semelhantes os naturais.

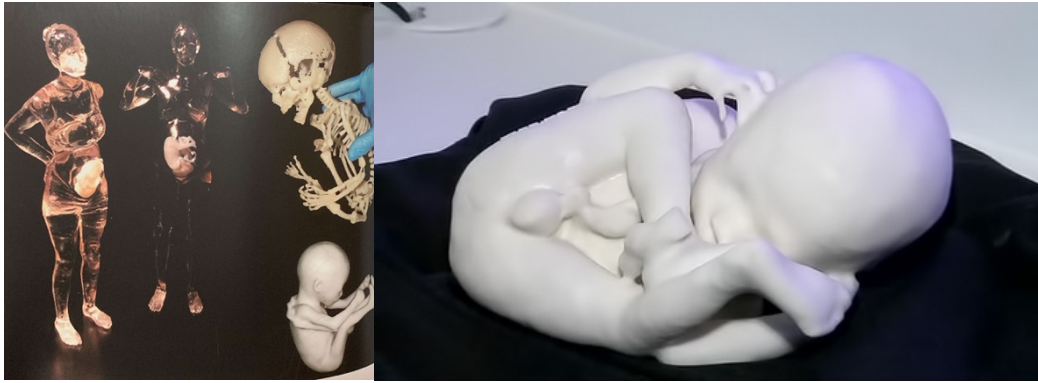


Figura 56: modelo impresso da mãe e do feto. Fonte: (Lopes et al., 2013).

3.2.5 Esporte

A impressão 3D está modificando a maneira como os tacos de golfe estão sendo feitos, desde o design até a fabricação. Os tacos têm uma infinidade de variáveis que contribuem para o melhor desempenho nas jogadas, tais como área e formato da face de contato, profundidade da cavidade, ângulo do taco e ângulo de ressalto, design do sulco (formas, padrões e profundidades) e peso. Pela primeira vez, os jogadores poderão ajustar os vários parâmetros do design ao taco. Com sistemas de produção aditiva esses novos tacos passarão facilmente da prototipagem para a produção em massa. A impressão 3D (Figura 57) reduz em cerca de 82% em comparação com a usinagem. (Markforged, 2019)



Figura 57: tacos impressos em 3D. Fonte: Markforged.

A equipe francesa de corrida de motos TransFIORmers, patrocinada pela Renishaw, empresa britânica pioneira na impressão de motos, está transformando a categoria. Juntas conseguiram desenvolver um sistema de suspensão dianteira diferente de qualquer peça empregada tradicionalmente, utilizando, para tanto, tecnologia de impressão em metal. Anteriormente, a equipe fazia uso de uma versão em aço que exigia a montagem e soldagem de doze partes. A otimização topológica

proporcionou uma redução de peso de aproximadamente 40%, reforço da rigidez, mais precisão e controle sobre as tolerâncias em uma única peça (Figura 58). (Larrondo, 2018)



Figura 58: otimização da peça, e a nova peça impressa ao lado da antiga. Fonte: Transförmes.

3.3 Conclusões

O estudioso de design John Heskett³⁴ construiu a frase: "design é projetar um design para produzir um projeto" para demonstrar as várias facetas do vocábulo "design". Tantas opções confundem-se até o momento que se obtém o conhecimento necessário para uma real mudança de pensamento no projetar, para que tal não seja feita de modo superficial e a evolução não seja passageira. (Wujec et al., 2011)

Num futuro próximo, produtos do dia-a-dia, de aviões a cadeiras, serão criados por meio do design generativo com o auxílio de computadores que apresentaram soluções antes impossíveis de serem concebidas. Os objetos poderão ter formas inovadoras ou serem feitos com materiais exclusivos. Os computadores requerem softwares para realizar tarefas, da mesma forma que as impressoras 3D requerem um arquivo tridimensional para fazer uma peça. Esses arquivos podem ser comprados, baixados online, ou criados em softwares de CAD. O uso desses programas é de extrema importância para um projeto bem-sucedido. A impressoras ainda não possuem um botão de desfazer, uma vez iniciada a impressão não há como desfazer o processo, apenas interrompê-lo. Mario Carpo (2011) em seu livro resume:

³⁴ John Heskett foi um escritor britânico sobre o valor econômico, político, cultural e humano do design industrial. Estas foram consideradas como contribuições significativas para a história do design.

Algoritmos, software, hardware e ferramentas de manufatura digital são os novos padrões de design de produto [...] Ao contrário de uma impressão mecânica, que fisicamente marca a mesma forma em objetos, uma impressão algorítmica permite que formas externas e visíveis mudem e se transformem de um objeto para outro. (CARPO, 2011)

A digitalização 3D é um importante recurso de engenharia reversa, mas também está sendo utilizada para gerar inovações em várias áreas. Aliada à manufatura aditiva, pode ser usada para agilizar o processo de desenvolvimento de produtos, seja para começar a construir modelos digitais, seja incorporando designs existentes, digitalizando projetos esculpidos à mão ou escaneando à forma exata do corpo humano.

Atualmente, a maioria dos usuários estão mais preocupados com as possibilidades que a tecnologia oferece do que em pensar objetos inovadores. O processo e o conjunto de experiências de busca da otimização do design através da manufatura aditiva devem ser o principal objetivo dos usuários dessa tecnologia, tornando-a mais adequada às necessidades do consumidor, em menos tempo, com menos desperdício de material e menos impacto negativo no planeta.

Já sabemos que a velocidade para transformar ideias em objetos físicos é mais rápido do que nunca. Possuímos ferramentas e recursos que nos permitem criar e inovar com facilidade. Um importante fator é sabermos como aplicar esses recursos para que as mudanças e inovações se tornem reais. A MA pode ser de grande valia para qualquer pessoa envolvida na criação ou fabricação de objetos físicos. Design de produtos inovadores é complexo, leva tempo e experimentação. A criação, a fabricação e o design estão mudando. É necessário agora mudar a forma de pensar.

Capítulo IV – A nova era da manufatura

Aqui está a história de duas décadas de inovação em duas frases: os últimos dez anos foram sobre descobrir novas maneiras de criar, inventar e trabalhar juntos na *Web*. Os próximos dez anos serão sobre a aplicação dessas lições ao mundo real. (ANDERSON, 2012)

Os computadores e a internet democratizaram as ferramentas de criação e de produção. Qualquer indivíduo com a ideia de um serviço e um computador pode transformá-la em um produto com algumas linhas de código por meio da programação, e fazer diferença na sociedade, como é o caso de diversos aplicativos móveis lançados diariamente. Mas esse é o mundo dos bits (do inglês *binary digit*), menor unidade de informação que pode ser armazenada ou transmitida do mundo digital que reformulou as bases da cultura à economia. (Anderson, 2012)

Porém, vivemos no mundo dos átomos, cercado por objetos físicos, produzidos em sua maioria pela indústria tradicional. Apesar de toda a sua importância, a indústria online ainda é um mercado secundário na economia mundial, representando cerca de US \$ 20 trilhões de receitas, segundo o Citibank e a Oxford Economics³⁵. A receita de produtos segundo a mesma pesquisa é de cerca de US \$ 130 trilhões. Em suma, o mundo dos átomos é pelo menos cinco vezes maior que o mundo dos bits. (Anderson, 2012)

Contudo, os produtos físicos são cada vez mais informações digitais fabricados por máquinas automatizadas. De certo modo, o hardware não deixa de ser software. Produtos se tornam propriedade intelectual incorporada em componentes ou arquivos tridimensionais. Quanto mais produtos se tornam digitais, mais podem ser tratados como informações: criados em conjunto com computadores, compartilhados online, personalizados e reinventados. “Em suma, a razão pela qual os átomos são os novos bits é que eles podem cada vez mais ser feitos para agir como bits.” (Anderson, 2012)

A revolução da fabricação não está apenas diversificando a manufatura de produtos, está possibilitando que qualquer usuário seja capaz de produzi-los e os comercialize sem depender de grandes indústrias (Figura 59). Segundo Chris Anderson em seu livro *Makers* a “A maior transformação não está na maneira como

³⁵ Disponível em: http://www.citibank.com/transactionservices/home/docs/the_new_digital_economy.pdf

as coisas são feitas, mas em quem está fazendo.” (Anderson, 2012). Gershenfeld (1999) em seu livro *FAB*, define:

Percebi que o mais interessante da fabricação digital é a fabricação pessoal. Não para fazer o que você pode comprar na loja, mas para fazer o que você não pode comprar. [...]Exatamente como a mudança dos computadores pessoais. Eles não são usados para a mesma tarefa. [...]O mesmo será verdade para fabricação pessoal. (GERSHENFELD, 1999)

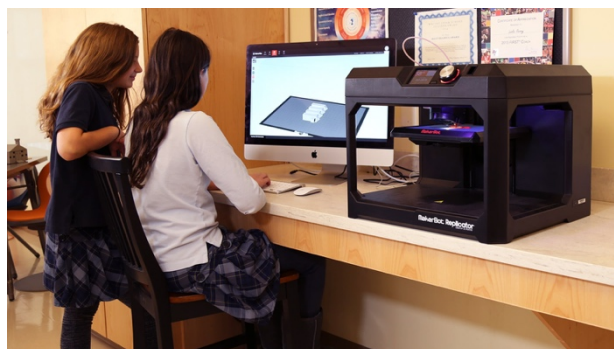


Figura 59: duas crianças em casa utilizando uma impressora 3D. Fonte: Makerbot

A nova era da manufatura percorre vários caminhos e se desenvolve em cada um deles de forma diferente, de acordo com quem está utilizando. Passa pelo indivíduo comum que está em sua casa com uma impressora 3D de *desktop*, mas está pesquisando, participando de comunidades e produzindo conteúdos na internet; pelos mercado de serviços, em que o usuário envia um arquivo digital via internet e a fabricação é feita por uma empresa que imprime e envia ao consumidor a peça pronta; até chegar nas grandes empresas, com impressoras 3D profissionais que envolvem a fabricação de peças de alta qualidade e materiais diferenciados.

“A ideia da palavra fábrica está mudando. Assim como a internet democratizou a inovação em bits as impressoras 3D estão democratizando a inovação em átomos.” (Anderson, 2012) Carls Bass em uma entrevista³⁶ explicou o que há de diferente no modo de fazer as coisas:

A capacidade de produzir um pequeno número de itens de alta qualidade e vendê-los a preços razoáveis está causando uma enorme perturbação econômica. Nele, você pode ver o futuro da manufatura. [...]Em um processo de fabricação computadorizado, como a impressão 3D, a complexidade e a qualidade são oferecidas sem nenhum custo. [...]Uma impressora de papel tradicional pode imprimir um círculo ou uma cópia da Mona Lisa com a mesma facilidade. A mesma regra se aplica a uma impressora 3D. (CARL BASS, 2011)

³⁶Disponível em: http://www.washingtonpost.com/national/on-innovations/the-pastpresent-and-future-of-3-d-printing/2011/08/21/gIQA4fJZJ_story.html

4.1 A revolução dos modos de fabricação

Para entendermos como a MA pode ser disruptiva, é preciso saber como fazemos os produtos hoje, por isso dividiremos a manufatura atual em três áreas distintas: a primeira é pelo processo subtrativo, em que o material é retirado de um bloco de material (figura 60).

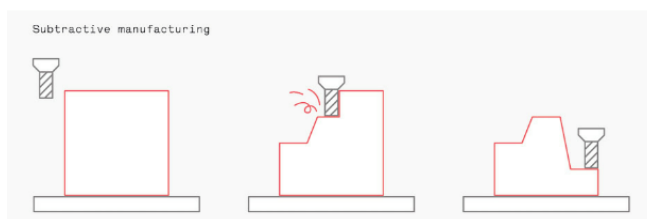


Figura 60: representação da fabricação subtrativa. Fonte:3Dhubs.

O segundo é o formativo por meio de moldes, em que é aplicada uma força ao material para moldá-lo no formato do desejado (figura 61).

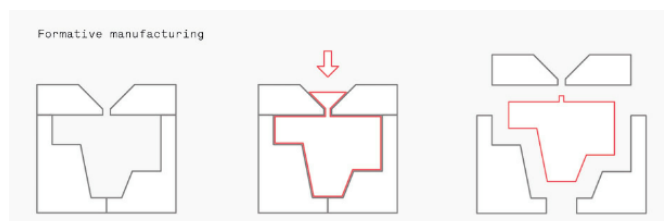


Figura 61: Representação do processo formativo. Fonte: 3Dhubs

O terceiro é a aditiva, em que o objeto é construído sobrepondo camada por camada (figura 62). A forma aditiva de se construir um objeto é um método antigo de fabricação, e se popularizou pelo nome que é conhecida: Impressão 3D.

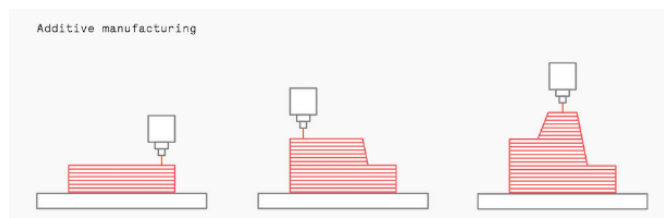


Figura 62: Representação do processo aditivo. Fonte: 3Dhubs.

As duas primeiras áreas descritas acima estão sendo usadas, em sua maioria, pela indústria tradicional para fabricação de produtos em grande escala há muitos anos. Porém, esse cenário começou a mudar com as novas aplicações da tecnologia

digital e a evolução dos processos de manufatura aditiva, mostrando ao mercado as muitas possibilidades que juntas podem trazer.

Um excelente exemplo é a companhia GE (*General Electric*), que nos Estados Unidos construíram um centro de impressão 3D e começará a produzir em escala uma peça de níquel para as turbinas dos aviões da empresa Airbus A320neo. A GE espera reduzir o consumo de combustível em 15% com a mudança. A peça será impressa na tecnologia SLS (figura 63) e sua utilização possibilitará aos engenheiros a redução do custo de desenvolvimento e produção, bem como a liberdade do design na hora da criação. Greg Morris, gerente geral de tecnologias aditivas da GE *Aviation* disse em uma entrevista: “Antes que a GE visasse o redesign, o bico era composto por 20 peças diferentes adquiridas de fabricantes independentes que eram então cuidadosamente revestidas e soldadas. A impressão 3D transformou completamente esse processo”. Casos como esse são cada vez mais comuns na indústria de um modo geral. (Autodesk, 2018)



Figura 63: a peça impressa que será substituída na nova turbina. Fonte: GE.

Produzir milhares de martelos é muito mais barato em processos de escala como a injeção de plástico. Para uma fábrica produzir um único martelo gera altos custos, o tempo de configurar uma máquina é o mesmo para fazer uma peça ou muitas, além do custo inicial dos moldes ser elevado. À medida que as técnicas de fabricação aditiva melhoram, torna-se viável uma produção parcial de baixo a médio volume de produtos, acelerando o processo de desenvolvimento, e minimizando os erros, e até mesmo impressão diretamente dos próprios moldes para injeção de plásticos, permitindo a rápida verificação do projeto, amenizando um dos maiores custos (Figura 64).



Figura 64: molde de injeção impresso em 3D usado para fabricar um pequeno lote de gabinetes de sensores. Fonte: Promolding.

A grande concorrência e a crescente complexidade dos produtos têm exigido mudanças das empresas para se destacarem no mercado e conseguirem atingir as necessidades do seu público de forma rápida, com qualidade e competitividade. Essas alterações envolvem tanto aspectos de gestão da empresa como também o emprego de novas técnicas e ferramentas de projeto, análise, simulação e otimização de componentes. A tecnologias digitais e a manufatura aditiva possuem um papel importante nesse novo cenário.

4.1.1 Custos

O custo (Figura 65) é um fator importante para a viabilidade do mesmo no mercado. Nas grandes empresas é muitas vezes o fator determinante para a fabricação dependendo da quantidade de peças a serem produzidas. Com a MA essa preocupação é minimizada, pois produzir uma ou muitas unidades da mesma peça é praticamente o mesmo preço variando somente o tempo.

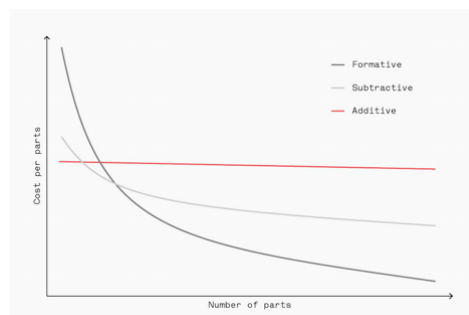


Figura 65: tabela de custo por parte nas três áreas de manufatura. Fonte: 3Dhubs.

Como acontece com qualquer nova tecnologia, não se sabe quando esta se pagará. As impressoras hoje variam de \$200 a US \$ 1 milhão de dólares. O investimento inicial, independente da tecnologia, é alto em virtude da máquina e os

custos recorrentes são os materiais e a energia elétrica. Se não for possível o investimento, existem os serviços de empresas especializadas, mas, geralmente, é mais barato imprimir em máquina própria do que encomendar uma impressão pela internet. (Redwood; Schoffer; Garret, 2017)

Produzir online não gera custos e, caso haja algum fracasso, no máximo algumas linhas de código terão que ser reescritas. Mas, no mundo real, falhar pode significar prejuízos irreparáveis. Fabricar produtos é caro e são necessários equipamentos e conhecimento. “Quando um site deixa de existir, não gera consequências maiores, mas se uma fábrica fecha, muitas pessoas perdem seus empregos, e as dívidas podem assombrar os donos pelo resto de suas vidas.” (Anderson, 2012)

4.2 Fabricação pessoal

Uma vez que os computadores se tornaram pequenos o suficiente e baratos o suficiente para que os indivíduos os possuíssem, sua aplicação tornou-se uma questão de preferência pessoal, e não de política corporativa[...]Uma vez que os indivíduos pudessem escrever programas ou configurar pacotes para as suas necessidades, em vez de se deslumbrar com a estupidez de outra pessoa, eles poderiam fazer algo a respeito. (GERSHENFELD, 1999)

Com as impressoras 3D de desktop está acontecendo a mesma coisa. A MA para indivíduos é tão promissora quanto os computadores. Ser capaz de produzir diretamente da sua mesa de trabalho um produto específico que atenda a sua necessidade é revolucionário.

Quando se fala de fabricação pessoal, o processo FFF é o mais utilizado em impressoras de *desktop* de baixo custo. A maioria das impressoras é tecnicamente semelhante às industriais de ponta, mas suas capacidades diferem. A principal diferença entre elas é a das características dos materiais disponíveis. As máquinas industriais podem produzir peças com os mesmos materiais que as máquinas de desktop, porém, com maior precisão, qualidade e menor tempo. À medida que hardwares, materiais e softwares evoluem, a diferença entre a industrial e a de desktop está diminuindo, igualando a qualidade das peças. Segundo Chris Anderson:

A grande oportunidade no novo Movimento *Maker* é a capacidade de ser pequeno e global. Ambos artesanal e inovador. Ambos de alta tecnologia e de baixo custo. Começando pequeno, mas ficando grande. E, acima de tudo, criar o tipo de produtos

que o mundo quer, mas ainda não sabe, porque esses produtos não se encaixam perfeitamente na economia de massa do modelo antigo. (ANDERSON, 2012)

O início do movimento *maker* marcado pelo lançamento da revista Make em 2005, pela editora O'Reilly. Concomitantemente, foi criada uma famosa feira organizada pela revista Maker Faire (Figura 66) na Califórnia Estados Unidos, que hoje atrai multidões de *makers*³⁷ ao redor do mundo.

Na cultura *maker* um objeto não é mais algo meramente para consumo. O objeto pode ser criado, adaptado à necessidade de um usuário. O design é livre da grande indústria. As ferramentas acessíveis tornam participantes de uma plataforma social permitindo colaborar, criar, customizar e produzir. O design deixou de ser uma coisa que se aprecia e passou a ser uma “coisa” que se produz. (ANDERSON, 2012)



Figura 66: Maker faire New York 2018. Fonte: Maker Faire.

Reconhecendo o poder desse movimento, no início de 2012, o governo Obama³⁸ lançou um programa para criar espaços com tecnologia de fabricação digital, conhecido como FAB Lab. O programa foi implantado em mil escolas americanas nos quatro anos subsequentes, com o intuito de criar uma nova geração de projetistas e inovadores.

Segundo Gershenfeld (1999), os Fab Labs (do inglês *Fabrication Laboratory*) são espaços especiais de trabalho equipados com tecnologias de fabricação digital. O laboratório surgiu da aula “*How to make (almost) anything*” ministrada por ele no MIT. Essa disciplina foi idealizada com intenção de proporcionar aos alunos a oportunidade de aprender como utilizar as ferramentas

³⁷ Segundo Chris Anderson *Makers* são pessoas que estão fazendo algo novo usando ferramentas digitais, projetando e produzindo.

³⁸ Disponível em: <http://makerspace.com/2012/01/16/darpa-mentor-award-to-bring-making-to-education/#more-43>

de produção, incentivando-os a serem autores de suas criações até a fabricação. (Gershenfeld, 1999)



Figura 67: Garagem FAB Lab em São Paulo. Fonte: Garagem FAB Lab

Logo as tecnologias de MA se tornarão tão universais e fáceis de usar quanto as impressoras para imprimir em papel, presentes maciçamente nas mesas de trabalho. Se a história se repetir, mudará o mercado de produtos consumíveis assim como o microprocessador fez há décadas para o mercado de computadores pessoais.

4.3 Indústria 4.0

Segundo a chanceler da Alemanha Angela Merkel, o conceito da indústria 4.0 pode ser definido como: “a transformação completa de toda a esfera da produção industrial através da fusão da tecnologia digital e da internet com a indústria convencional”.³⁹ Apesar da origem alemã, o conceito se expandiu para outros países sob diversas iniciativas de governos, como uma tendência tecnológica mundial. Segundo os dados do European Parliament Research Service⁴⁰, a indústria 4.0 irá influenciar consideravelmente a economia mundial, com potencial de gerar ganhos de eficiência de produção entre 6% e 8%.

O termo indústria 4.0 vem sendo disseminado mundialmente. Também conhecida como a 4ª revolução industrial, já que, assim como as três primeiras revoluções na manufatura mundial (Figura 68), é marcada pelo conjunto de mudanças nos processos de manufatura, design, produto, operações e sistemas relacionados à produção, aumentando o valor na cadeia organizacional e em todo o ciclo de vida do produto. O 4.0 deriva da quarta versão, onde os mundos virtuais e físicos se fundem através da internet. (SISTEMA FIRJAN, 2016)

³⁹ ³⁸ EUROPEAN PARLIAMENT. Industry 4.0 Digitalisation for productivity and growth. Setembro de 2015. Disponível em: <[http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS_BRI\(2015\)568337_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS_BRI(2015)568337_EN.pdf)>. Acesso em: 29 fev. 2018.

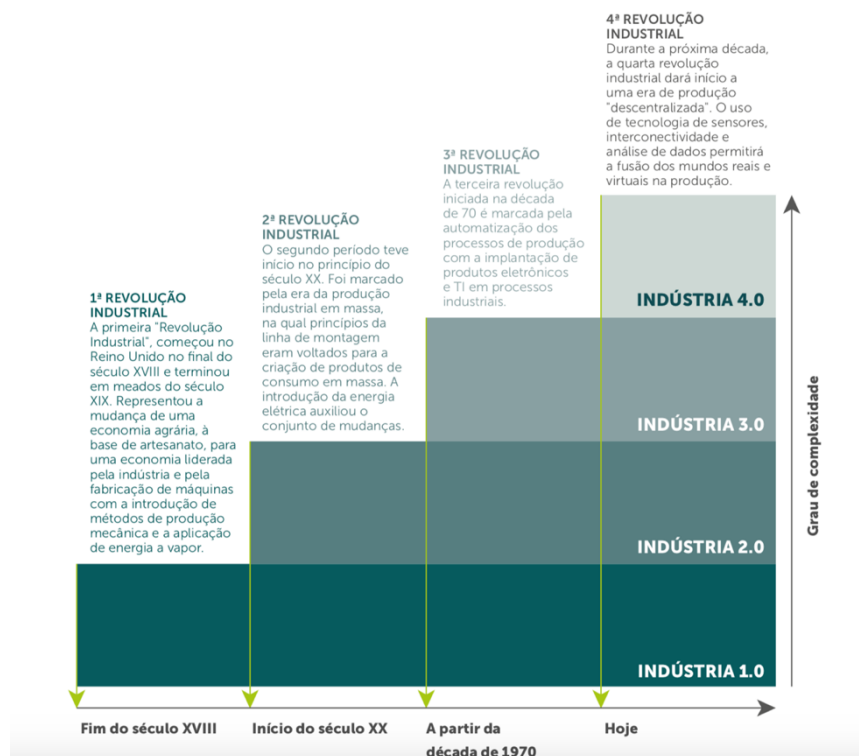


Figura 68: gráfico com revoluções industriais. Fonte: Firjan.

O termo cunhado na Alemanha e amplamente difundido no mundo industrial não pode, necessariamente, ser aplicado às indústrias brasileiras. Segundo consenso de especialistas, a indústria nacional ainda se encontra em grande parte na transição do que seria a indústria 2.0 para a indústria 3.0, empregando automação e robótica de forma ainda limitada. Para sermos competitivos podemos e devemos queimar etapas, adotando as inovações relativas à Indústria 4.0, ainda que não tenhamos completado as revoluções anteriores. (Sistema Firjan, 2016)

Com as mudanças no processo tradicional o setor industrial passou a se interessar pela manufatura aditiva e hoje trabalha para integrar as tecnologias aditivas com as já existentes, para maximizar o tempo e diminuir custos na linha de produção. Porém, muitos se perguntam se a manufatura aditiva irá um dia substituir a produção industrial convencional, mas para os especialistas da área não deve ser essa a preocupação. Até porque o tempo para se produzir uma única peça é maior do que se comparado a produção em massa. O que se espera é a união das tecnologias tradicionais e da manufatura aditiva para que juntas empreguem o melhor que cada uma tem a oferecer. Abaixo segue um gráfico (Figura 69) comparando as duas manufaturas, tradicional e aditiva, e o ponto de equilíbrio entre as duas na fabricação. (3D System, 2018)

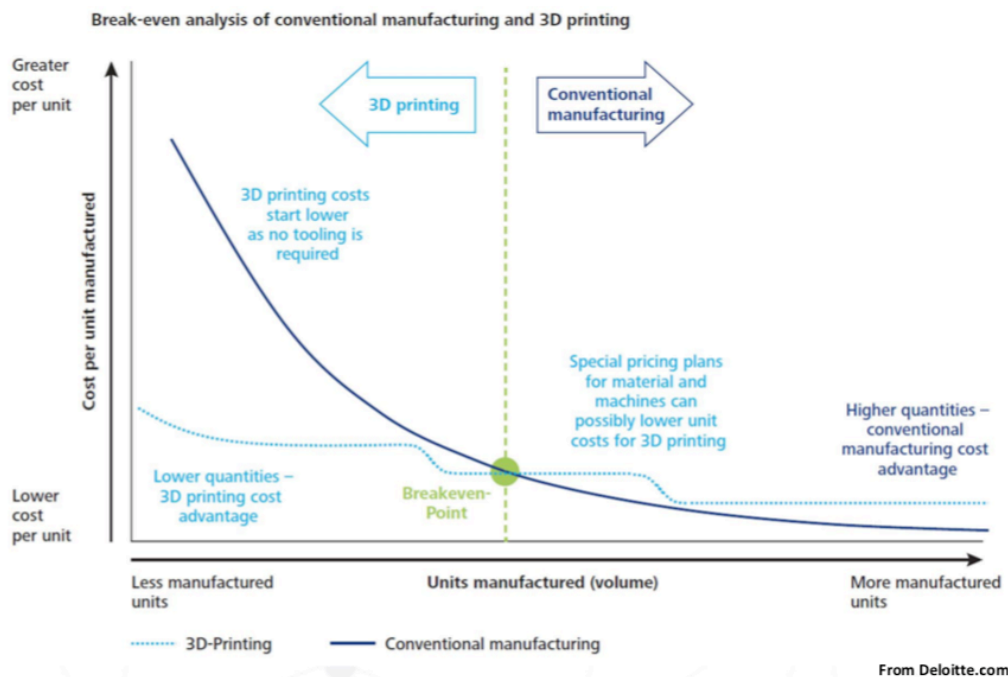


Figura 69: gráfico comparativo de manufatura aditiva e manufatura tradicional. Fonte: Deloitte

Não é só na produção de peças finais que a MA pode ajudar as indústrias. Há muitas outras oportunidades no ambiente de produção para integrar e aumentar a eficiência do fluxo de trabalho. Por exemplo, gabaritos e acessórios impressos são uma ótima maneira de garantir uma montagem eficiente de peças na linha de produção, maximizando as horas de trabalho e minimizando o desperdício.

Com muitas empresas de manufatura trabalhando constantemente para melhorar a produtividade e reduzir custos, novas técnicas utilizando a manufatura aditiva podem ser ideais para alcançar objetivos, como a implementação de manoplas, gabaritos e acessórios em uma linha de produção. Essas peças auxiliam na usinagem, posicionamento e montagem nas linhas de fabricação. O alto nível de personalização e precisão exigidas geralmente resultavam em longos prazos de produção. Esse cenário está mudando em empresas que adotam impressoras 3D na fábrica e estão customizando peças diariamente para acelerar o processo. (3DHubs, 2017)

Um exemplo é a fábrica da Dixon Valve em Maryland Estados Unidos, na qual se fabricam diferentes válvulas, conexões e medidores. Cada linha de produto requer equipamento personalizado, incluindo ferramental e garras para prender peças específicas com eficiência. As garras personalizadas presas ao final de cada braço robótico usado na linha de montagem exigem alta resistência, devem ser

fáceis de usar e seguras, ter resistência química devido ao ambiente de trabalho e resistência ao desgaste por uso repetido. Depois de comparar as técnicas tradicionais de fabricação e as opções de impressão 3D, um conjunto de garras foi projetado e impresso para o final de cada braço robótico com um filamento composto de plástico e fibra de carbono (Figura 70). (Markforged, 2018)

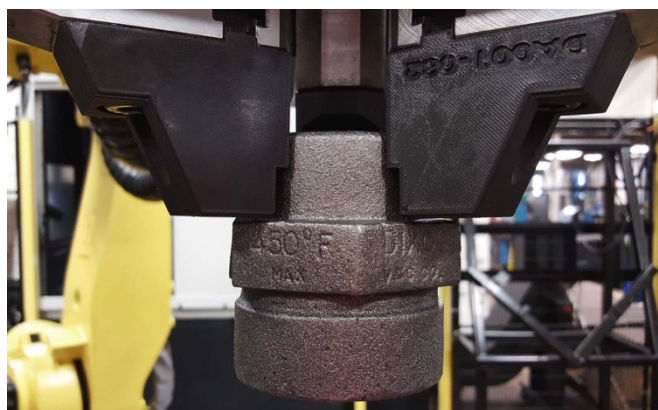


Figura 70: garras personalizadas usadas em um braço robótico automatizado para posicionar.
Fonte: Markforged

4.4 Conclusões

A MA proporciona uma flexibilidade sem precedentes para fabricar, tornando a produção de baixo volume viável e permitindo que produtos personalizados sejam produzidos em escala. Podemos observar a manufatura aditiva hoje em diversos setores que comprovam sua evolução e nos faz acreditar que um dia ela estará presente de forma massiva nas residências e na indústria.

Apesar das tecnologias aditivas estarem inseridas na quarta revolução industrial, sua utilização no fluxo de produção ainda está longe da grande maioria das empresas e as que a utilizam não sabem ainda como explorar por completo todo o potencial, pois o pensamento ainda está na forma de manufatura tradicional. O processo é diferente e estamos aprendendo aos poucos tudo o que podemos fazer. “A revolução não é manufatura aditiva versus manufatura subtrativa; é a capacidade de transformar dados em coisas e coisas em dados.” (Gershelfeld, 2018)

Rich Karlgaard (2011), editor da revista Forbes, escreve⁴¹ que a impressão 3D “poderia ser a tecnologia transformadora do período 2015-2025”:

⁴¹ Disponível em: <http://www.forbes.com/sites/richkarlgaard/2011/06/23/3d-printin-will-revive-american-manufacturing/>

A impressão 3D possui o potencial trazer a economia da manufatura de uma indústria de grande escala de volta a um modelo artesanal de pequenas lojas de design com acesso a impressoras 3D. Em outras palavras, fazer coisas, coisas reais, poderia deixar de ser uma indústria de capital intensivo em algo que se parece mais com arte e software. Isso deve favorecer o conjunto de habilidades criativas. (Karlgaard, 2011)

Habilidades criativas são um princípio do movimento *maker*. Enquanto a indústria ainda não compreende como a manufatura aditiva pode se encaixar completamente na sua linha de produção, os *makers* estão voltados para suas próprias necessidades, fazendo produtos para o seu próprio uso. A manufatura aditiva está dando aos indivíduos o poder sobre os meios de produção, permitindo o empreendedorismo de baixo para cima.

A ideia não é criar grandes empresas, mas sim libertar-nos de grandes empresas. Chris (2006) conclui:

O que vamos ver é simplesmente mais. Mais inovação, em mais lugares, de mais pessoas, focada em nichos mais estreitos. Coletivamente, todos esses novos produtores vão reinventar a economia industrial, muitas vezes com apenas alguns milhares de unidades de cada vez, mas com os produtos certos para um consumidor cada vez mais exigente. (ANDERSON, 2006)

Espera-se com isso criar novos sistemas de manufatura e aplicações. O conhecimento será muito importante e precisará ser traduzido em produtos inovadores, fabricados por métodos de produção também inovadores.

Capítulo V – Estudo de casos no combate de robôs

A manufatura aditiva e suas características do processo, conforme discorrido ao longo dessa dissertação, são uma excelente ferramenta para desenvolvimento de projetos robóticos personalizados. Uma busca rápida online pode revelar milhares de peças relacionadas a robôs, que usuários projetaram e disponibilizaram, de forma gratuita ou paga, para download. Porém, como a robótica é um campo muito vasto, esse capítulo destina-se ao estudo de casos focados em uma área específica, chamada combate de robôs, que ainda não é unanimidade com relação a utilização da impressão 3D, mas está crescendo e trazendo novos competidores a cada ano.

A história do combate começa na cidade de Cambridge - Estados Unidos:

A primeira competição envolvendo confronto de robôs foi a “Design 2.007”, um evento de 2 noites que ocorre anualmente desde 1970 no MIT. Os robôs são construídos durante o semestre por alunos de graduação que cursam a matéria 2.007, *Introduction to Design and Manufacturing*. O objetivo é construir um robô rádio controlado que execute determinadas tarefas, como coletar bolas ou transportar peças, em uma arena de obstáculos. A cada ano a tarefa é modificada para estimular a criatividade. [...] (MEGGIOLARO, 2009) (Figura 71)



Figura 71: primeiro evento Design 2.007 no MIT. Fonte: MIT.

Formalmente o combate de robôs foi criado em 1993, quando MARC Thorpe, inspirado no filme *Star Wars*⁴², instituiu a primeira competição oficial de combate da história, a *Robot Wars*, disputado no ano seguinte no Fort Mason Center, em São Francisco - Califórnia (Figura 72).

⁴² *Star Wars* é uma franquia criada pelo cineasta George Lucas que conta com uma série de filmes de fantasia científica. O primeiro filme foi lançado em 25 de maio de 1977, e tornou-se um fenômeno mundial.

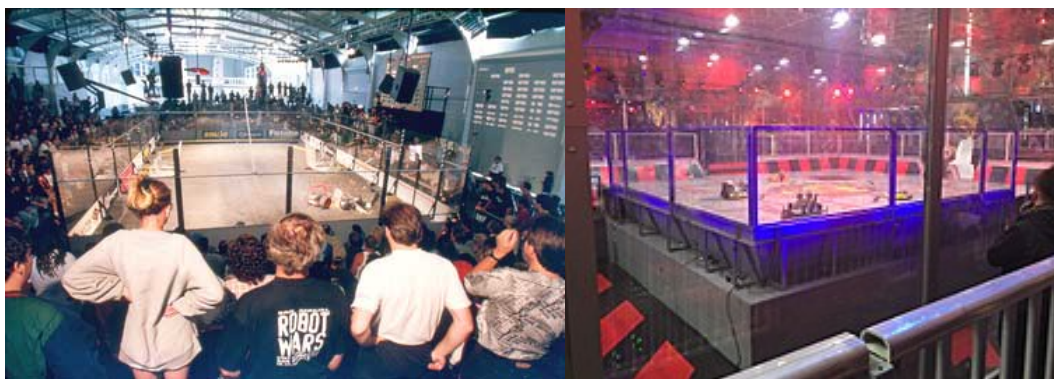


Figura 72: primeira competição de combate em 1994. Fonte: Robot Wars.

Com séries televisionadas a partir de 1997, as competições ganharam notoriedade e novos eventos passaram a acontecer ao redor do mundo, chegando ao Brasil em 2001 na Unicamp⁴³. Desde 2005 o *Winter Challenge* que desde 2005 é a maior competição de robôs da América Latina, organizada anualmente pela empresa Robocore⁴⁴ em diferentes cidades do país. Além desta, existem pelo menos mais 6 que são realizadas em vários estados ao longo do ano e o número de competidores, espectadores e robôs aumenta a cada uma delas (Figura 73).

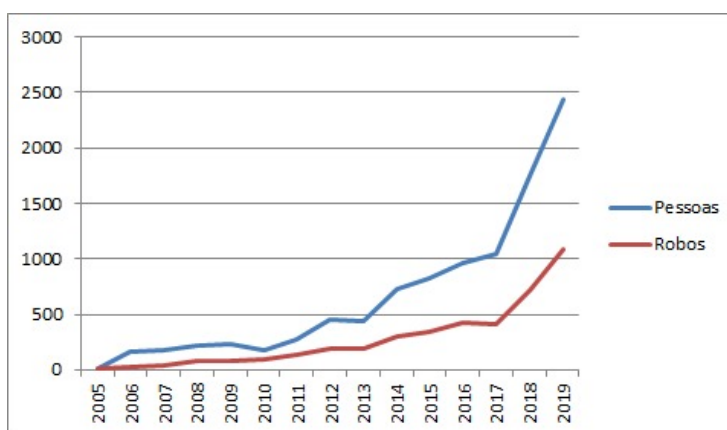


Figura 73: gráfico com a evolução dos competidores e robôs no Brasil. Fonte: autora.

Esse crescimento em parte se deve à exibição do show de TV Battlebots⁴⁵ no canal Discovery Turbo⁴⁶, no Brasil desde 2017, com a participação da equipe brasileira Riobotz (Figura 74) com o robô Minotauro, conquistou o terceiro lugar

⁴³ Universidade Estadual de Campinas

⁴⁴ A RoboCore é uma empresa, Ltda., que desde 2005 busca desenvolver a tecnologia de uma forma criativa e inovadora. Realiza competições, feiras, congressos além de palestras/cursos na área de robótica e atividades extra-curriculares.

⁴⁵ Battlebots é uma série de televisão de combate de robos com maior exposição na mídia até hoje, fundada em 1999 por Trey Roski e Greg Munson em São Francisco.

⁴⁶ Discovery Turbo é um canal pertencente a Discovery Inc. com a programação dedicada a máquinas como carros, motos, barcos e aviões.

na segunda temporada e vice-campeonato na terceira. Na série gravada em Los Angeles (EUA), equipes de vários países projetam, constroem e pilotam robôs para lutarem em uma arena cheia armadilhas.



Figura 74: equipe Riobotz e o robô Minotauro. Fonte: Battlebots.

O combate de robôs é um esporte de alta tecnologia, cujo propósito é o mesmo de qualquer outro: a superação de desafios e limites. As equipes participantes devem construir seus robôs com o objetivo de combater o adversário dentro de uma arena totalmente blindada e segura para os espectadores e competidores (figura 75A), baseado em regras⁴⁷ que podem variar de acordo com cada competição, mas de um modo geral são simples, e seguem os seguintes preceitos: as disputas se dão por categorias de peso (Figura 75B); lançamento de projéteis e interferências eletromagnéticas são proibidos; cada round tem duração máxima de 3 minutos e as funcionalidades do adversário devem ser desabilitadas. Caso os dois robôs sobrevivam, a decisão final é dos juízes que, com critérios previamente definidos, julgam o combate declarando um vencedor. (Meggiolaro, 2009)

⁴⁷Disponível em:

<https://www.robocore.net/upload/attachments/robocore__regras_combate_225.pdf>

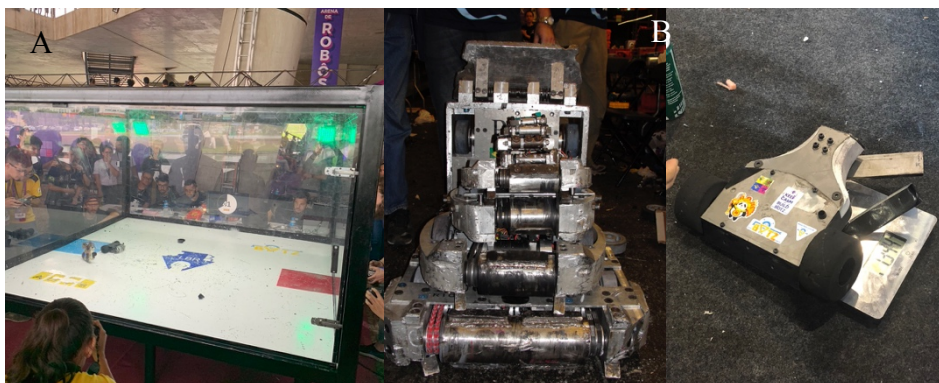


Figura 75:a) arena de combate; b) robôs de diferentes categorias. Fonte: autora.

Com o crescente interesse no esporte e a falta de regulamentação oficial as principais equipes do Brasil se uniram e criaram a Liga Brasileira de Robótica, com o intuito de fomentar o combate no país e estabelecer normas e regras atuais, ranking dos robôs por categoria, cancelamento eventos e qualificação de juízes.

A estreia da Liga foi em outubro de 2019 com o Hackcombot (Figura 76) realizada no festival de cultura digital Hacktudo na Cidade das Artes Rio de Janeiro. O evento foi um sucesso, aproximadamente 15.000 pessoas estiveram presentes e foram distribuídos mais de R\$ 8.000,00 em premiação dentre três categorias: *Beetleweight*, *Antweight* e *Fairyweight*.

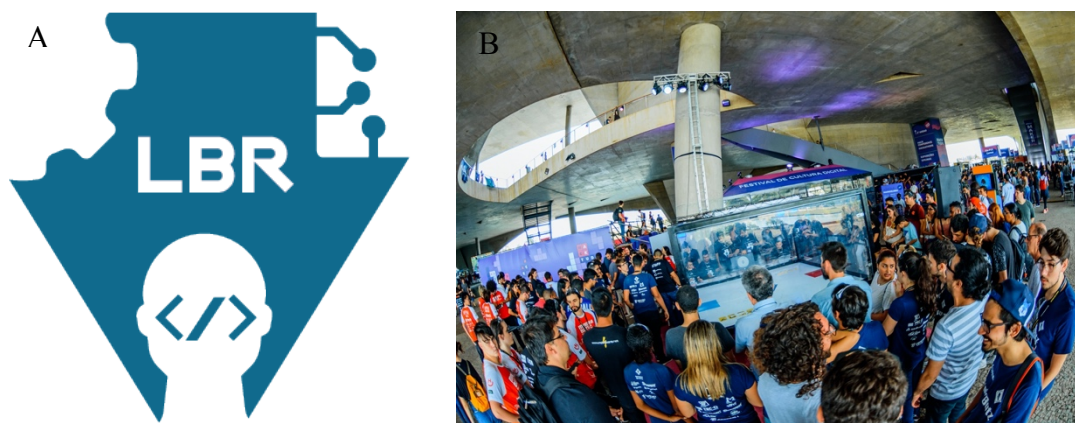


Figura 76:a) logo LBR; b) Evento Hackcombot 2019. Fonte: autora.

As categorias *Antweight* (454g) e *Beetleweight* (1,36kg) são as mais concorridas no Brasil, que, juntamente com a classe *Fairyweight*(150gr), a última a estreiar, compõe o que é chamado de robôs insetos. Eles geralmente são a porta de entrada para novos competidores no esporte devido ao menor investimento necessário e a facilidade de fabricação, tendo em vista o tamanho reduzido. O crescimento dessas categorias pode ser verificado no gráfico abaixo (Figura 77) e fundamenta o foco dos estudos de casos a serem apresentados ao longo do capítulo.

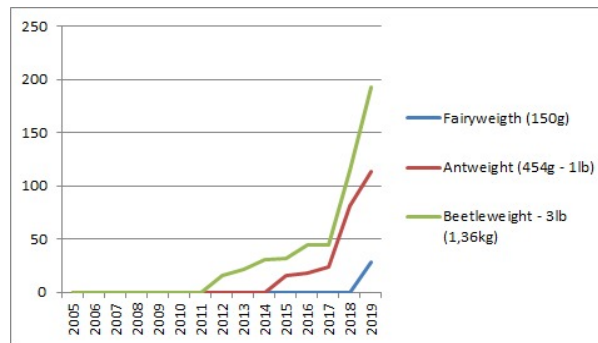


Figura 77: gráfico com o crescimento de robôs nas categorias de insetos. Fonte: autora.

A categoria de peso é a primeira decisão a ser tomada quando se pensa em construir um robô e é o ponto de partida para qualquer projeto. O passo seguinte é definir o tipo de arma que podem ser ativas ou passivas. “Existem basicamente 16 tipos: *rammers*, *wedges*, *lifters*, *launchers*, *thwacks*, *overhead thwacks*, *spears*, *spinners*, *saws*, *vertical spinners*, *drums*, *hammers*, *claspers*, *crushers*, *flamethrowers* e *multibots*”. A ativa é móvel e acionada durante o combate por meio do rádio controle. A passiva não oferece nenhum dano ao adversário, pois geralmente está atrelada ao chassi. Uma não se sobrepõe a outra, mas na teoria existe um esquemático (Figura 78) que demonstra qual leva vantagem sobre a outra. Um bom projeto e um bom piloto são essenciais e é mais importante do que qualquer figura. (Meggiolaro, 2009)



Figura 78: esquemático com os tipos de arma e qual se sobressai sobre a outra. Fonte: Riobotz

Estabelecida a categoria de peso e o tipo de arma principal, o desenvolvimento do projeto se inicia de fato com a escolha dos componentes, estimativa de custo e design. Dependendo das opções um robô pode chegar a milhares de reais. Os esboços iniciais podem ser feitos de diferentes modos, em rascunhos no papel ou até softwares de CAD (Figura 79A), variando de acordo com o conhecimento do projetista. Mas, atualmente os softwares de modelagem e de simulação são fundamentais para um bom projeto principalmente se for utilizar a fabricação digital⁴⁸ (Figura 79BC) para manufaturar as peças.

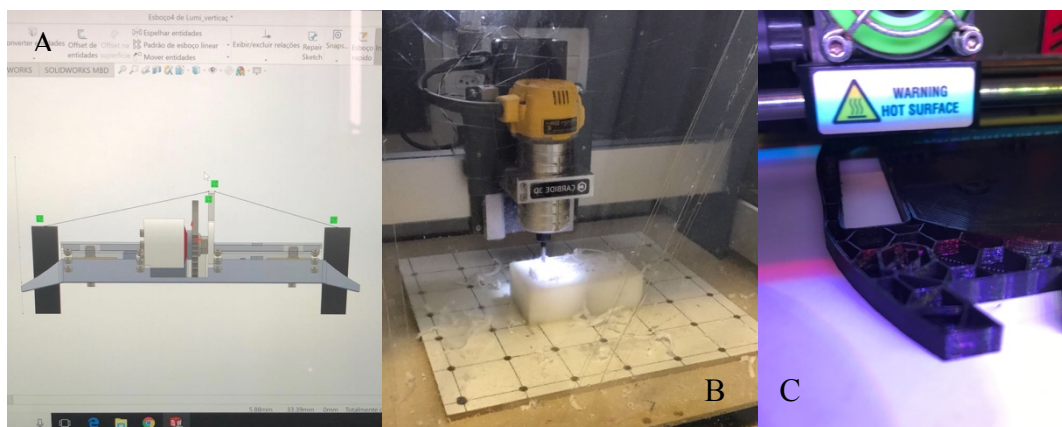


Figura 79: a) software de modelagem CAD; b, c) exemplos de fabricação digital, fresa CNC e impressão 3D. Fonte: autora.

Os projetos dos robôs de combate evoluíram exponencialmente juntamente com o conhecimento e as tecnologias. No início as armas eram fracas e muitos ganhavam simplesmente por estar funcionando no final da luta. Hoje, com a competitividade em alta, se o robô não for bem projetado e construído não resiste a muitos confrontos completo ou é totalmente destruído. Equipes chegam a ter componentes reservas para montagem de até três robôs na expectativa de que cheguem ao final da competição inteiros.

Projetar e construir um robô robusto é imprescindível para o êxito no resultado final, e demanda tempo, dinheiro e conhecimento. Os métodos tradicionais de fabricação geralmente levam tempo e são caros e só em combate é possível saber se as escolhas dos materiais foram corretas. Com o advento da impressão 3D, projetar e imprimir o próprio robô e seus acessórios se tornou uma

⁴⁸ A fabricação digital é um tipo de processo de fabricação onde a máquina usada é controlada por um computador. As formas mais comuns de fabricação digital são: Usinagem CNC, impressão 3D e corte a laser.

excelente alternativa para iniciantes e veteranos do esporte, facilitando e agilizando o processo de fabricação.

5.1 A manufatura aditiva aplicada ao combate

A adoção da tecnologia de impressão 3D no combate foi questão de tempo. Porém, por se tratar de um método novo e considerando a falta de pesquisas na área, ela ainda é experimental, e não é unanimidade entre os competidores que relataram a fragilidade como o principal ponto de desvantagem. A pesquisa online em anexo foi realizada com competidores presentes em um grupo Guerra de robôs no Whatsapp, e mostrou um panorama geral de como a impressão 3D está inserida no combate brasileiro. Ela ficou disponível por 7 dias para respostas. As categorias que mais a utilizam são a dos insetos, e os principais materiais são o PLA e o ABS com a tecnologia FFF. Está sendo usada em todas as partes do robô inclusive para estruturas inteiras, além de protótipos e acessórios internos, e a maioria não fez nenhum pós-tratamento. Como principal vantagem veem a facilidade de fabricação, rapidez e liberdade no design. Por fim, acreditam no crescimento da utilização da MA no combate por meio do desenvolvimento de novos materiais, tecnologias e no design.

Os materiais mais utilizados na tecnologia FFF são realmente frágeis quando em contato com metais girando em alta velocidade, mas, podem sim ser empregados para imprimir peças duráveis e resistentes. Para tal, são necessários alguns ajustes nas configurações de impressão e design, que podem tornar a estrutura e os componentes impressos competitivos e duráveis. Os mais importantes são altura da camada, encolhimento e deformação, suporte e filetes.

A adoção da impressão 3D no combate é tão promissora que, em 2018, levou à criação de uma categoria exclusiva para plástico, com o intuito de incentivar a inclusão de novos competidores, principalmente crianças (Figura 80). A categoria escolhida foi a *Antweight(456g)*, pensada para ser uma classe de entrada no esporte para aqueles que talvez não tenham acesso a um laboratório, materiais caros, ou que desejem experimentar algo diferente. As regras são as mesmas da categoria normal, exceto pela adição de três itens⁴⁹ relacionados ao material, conforme a seguir:

⁴⁹ Disponível em: <http://www.westernalliedrobotics.com/index.php/the-rules/special-plastic-class-rules>

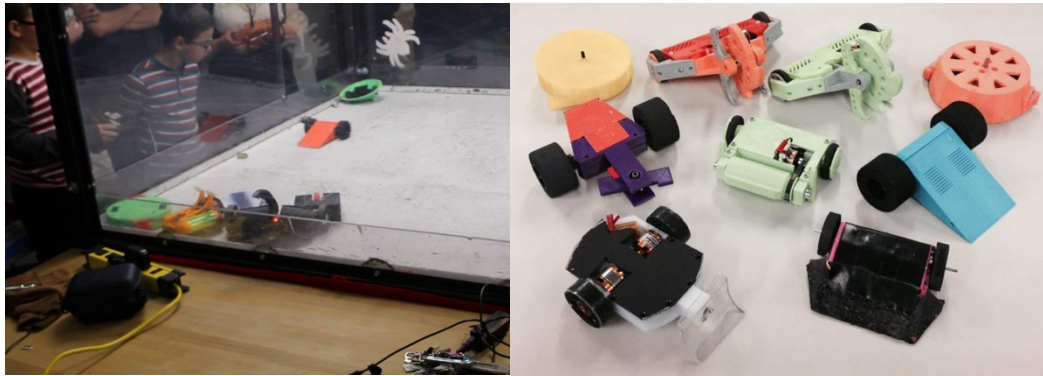


Figura 80: robôs *Antweight* de plástico. Fonte: Google.

- PET, PETG, ABS ou PLA, PLA + são os únicos materiais que podem ser usados para o chassi e as armas. Não são permitidos outros tipos de plásticos ou materiais como metal, fibra de carbono, UHMW, etc.
- Motores, eletrônicas, eixos, parafusos podem ser de qualquer material, mas não podem ser utilizados de forma a aumentar a integridade estrutural da armadura ou melhorar a arma.
- O robô pode ser desqualificado da competição caso viole alguma regra da categoria.

Com a evolução das tecnologias de MA e dos materiais suas aplicações puderam ser vistas, não somente nos robôs insetos, mas também maiores. Como é o caso da categoria *Heavyweight*(100kg), disputada somente fora do Brasil. Nesse tamanho, os robôs geralmente têm estruturas de alumínio ou aço, com armas de aço e, qualquer peso economizado em uma área pode ser aplicado em outra. Economizar peso, mas conservar força com impressão 3D é um processo complexo que passa pela escolha correta de materiais e design para produzir peças tão fortes quanto metal usinado.

A primeira equipe a usar impressão 3D em *Heavyweights* foi a *Team SawBlaze*⁵⁰, formada por estudantes de engenharia do MIT, que participou da segunda temporada da série de televisão *Battlebots* em 2018. A equipe teve apoio da empresa americana Desktop Metal⁵¹ para imprimir suas peças em metal. A

⁵⁰ Disponível em: <https://www.desktopmetal.com/case-study/battlebots/>

⁵¹ A Desktop Metal foi fundada em 2015 e está reinventando a maneira como as pessoas e manufatura produzem peças de metal - da prototipagem à produção em massa.

principal (Figura 81) foi feita em aço 4140⁵² para dar suporte às laterais que prendem a lâmina da arma e protegê-la. Com prazo e orçamento limitados, o time considerou vários processos de fabricação e, devido ao desafio de obter resistência, rigidez e leveza ao mesmo tempo, optou pela impressão 3D em metal. A peça foi otimizada virtualmente e o preenchimento foi ajustado para eliminar o excesso de material visando reduzir seu peso, se comparada com técnicas tradicionais de manufatura. O que resultou em uma redução de 90 – 95% no custo e peso se comparada a técnica tradicional de manufatura. Durante toda a competição, a peça funcionou perfeitamente, suportando repetidas e variadas tensões, sem falhas. (DESKTOP METAL, 2019)



Figura 81: peça do robô *Sawblaze* impressa em metal e no robô. Fonte: Desktop Metal.

A união dos grandes robôs com a MA deu tão certo que na quarta temporada da Battlebots em 2019, a empresa Markforged⁵³ foi umas das patrocinadoras do programa. Várias impressoras (Figura 82) ficaram à disposição das equipes participantes durante as duas semanas de gravação. Foram produzidas mais de 160 peças, o que permitiu reparar rapidamente os robôs danificados, melhorar o desempenho durante as lutas e, otimizar o design em relação aos adversários antes do combate seguinte, e sem a necessidade de se aguardar a próxima temporada para a resolução de falhas.

⁵² O aço 4140 é um dos aços de carbono mais versáteis caracterizado por sua tenacidade, alta resistência à fadiga, abrasão e ao impacto.

⁵³ A Markforged é conhecida pelas impressoras 3D de fibra de carbono e metal que produzem peças resistentes para uso final. Fundada em 2013 nos EUA, possui hoje mais de 300 funcionários.



Figura 82: impressoras disponíveis para os participantes imprimirem. Fonte: Markforged.

Os principais robôs a usarem as impressoras a seu favor na temporada 2019 foram: o Valkyrie, um *undercutter*, no qual 55 peças foram impressas, possibilitando o aprimoramento do projeto, sem as horas e as despesas de uma oficina mecânica normal; O HyperShock (Figura 83A), com mais de 30 peças que proporcionaram economia de custos, redução de peso e flexibilidade no design, mantendo o desempenho necessário no combate; o *Quantum* (Figura 83B), que usou 21 peças feitas em plástico com fibra que substituíram as usinadas em alumínio.(CREASE, 2019)



A



B

Figura83: a) robô HyperShock.; b) robô Quantum. Fonte: Battlebots.

A equipe do Valkyrie⁵⁴ (Figura 84A), em preparação para a temporada 2019, imprimiu mais de 200 peças, inclusive um protótipo completo em escala real (Figura 84B). As quatro principais áreas que manufatura aditiva os ajudaram com rapidez e eficiência, segundo os construtores foram: prototipagem (Figura 84C), ferramentas e fixação, peças finais e reparos, e melhorias.

⁵⁴ Disponível em: <https://markforged.com/blog/markforged-3d-printers-battlebots/>

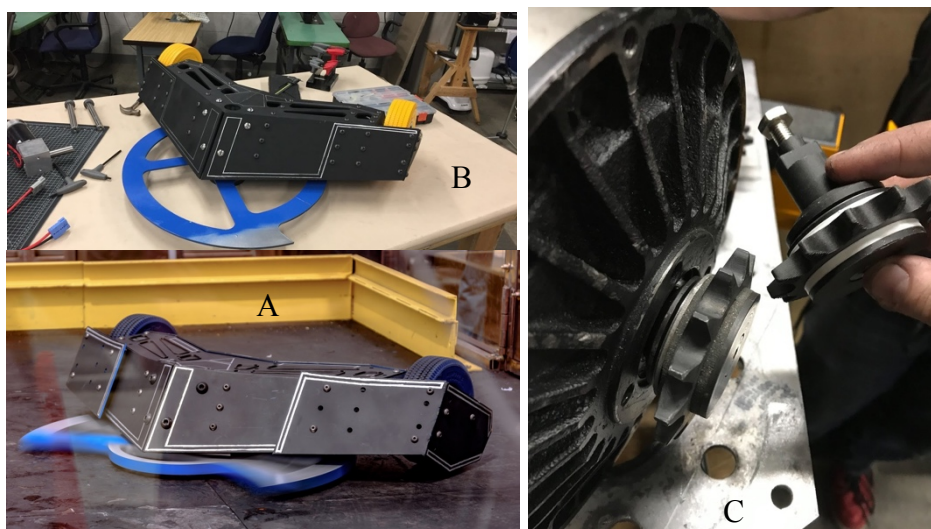


Figura 84: a) robô *Valkyrie*; b) protótipo em escala real do *Valkyrie*; c) protótipo da engrenagem impressa e a peça final. Fonte: Markforged.

A empresa Markforged, tem um papel valioso no combate, apoiando construtores desde 2015, como o Jamison Go, PhD do MIT, que imprimiu seu primeiro *antweight*, o DDT (Figura 85A) para competição. Ele continua a utilizar MA em seus robôs (Figura 85B), tornando-os inspirações para adotantes da tecnologia. No início ele disse: “Os concorrentes ficaram absolutamente espantados. Eles não acreditaram que tinha sido impresso em 3D (o robô DDT)” (traduzido de: ‘Competitors are absolutely astounded. They can’t believe that this is 3D printed’)⁵⁵

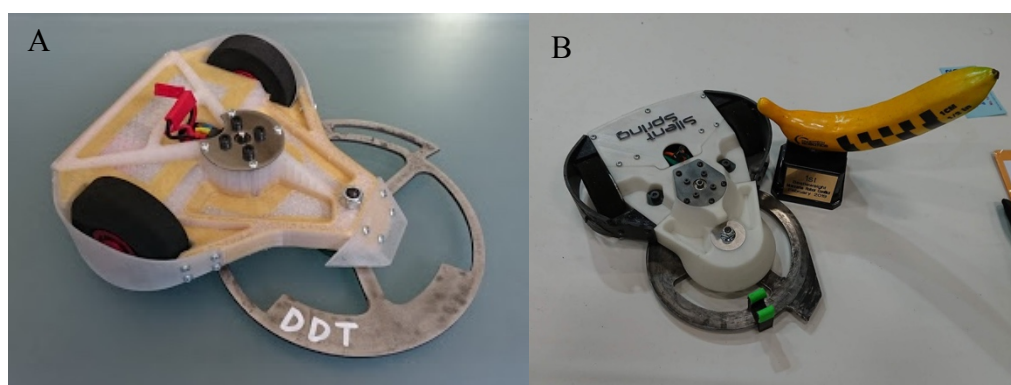


Figura85: a) robô DDT *antweight* em 2015; b) robôs *Silent Spring* 2019. Fonte: Jamison Go.

⁵⁵ Disponível em: https://s3.amazonaws.com/markforged-marketing-assets/Reseller+Portal/Case+Studies/Combat+Robotics/Markforged_ToughItOut+Case+Study_Web3.pdf

5.2 Estudos de casos

Há alguns anos no Brasil os materiais disponíveis para imprimir eram poucos e se restringiam, de um modo geral, ao PLA e ao ABS, mesmo porque a tecnologia das impressoras que não aceitavam outros tipos. Por isso o PLA foi escolhido para o primeiro robô de combate impresso do Brasil e um dos primeiros a competir no mundo: o Pocket da categoria *Fairyweight*(150g). A Impressora utilizada foi uma Replicator 2 da Makerbot (Figura 86), com a tecnologia FFF.

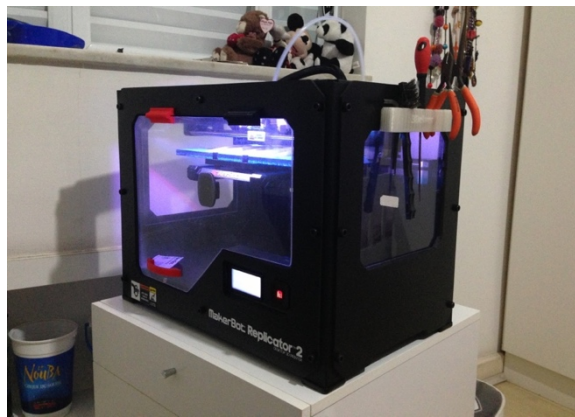


Figura 86: impressora Makerbot Replicator 2. Fonte: autora.

Em 2013 o corpo do Pocket, da categoria *Fairyweight*(150g), foi redesenhado utilizando o software de CAD Solidworks⁵⁶ (Figura 87) para a competição internacional Robogames⁵⁷, realizada em São Francisco (EUA). O novo projeto, impressionou competidores pela inovação. A peça foi impressa em PLA branco, com uma camada de 0.1mm de espessura, suporte, 100% de preenchimento, e depois foi coberto com placas de fibra de carbono para construir a rampa e aumentar a resistência. A tampa foi impressa em PLA transparente para as luzes internas ficarem visíveis. Os componentes internos foram os mesmos do antigo projeto.

⁵⁶ O SolidWorks é um software de CAD 3D que funciona no sistema operacional Windows. Ele baseia-se em computação paramétrica, criando formas tridimensionais a partir de operações geométricas elementares.

⁵⁷ RoboGames é a conhecida como a Olimpíada dos Robôs no qual competidores participam de mais de 50 eventos diferentes: robôs de combate, LEGO, hóquei, humanoides, futebol, sumô...

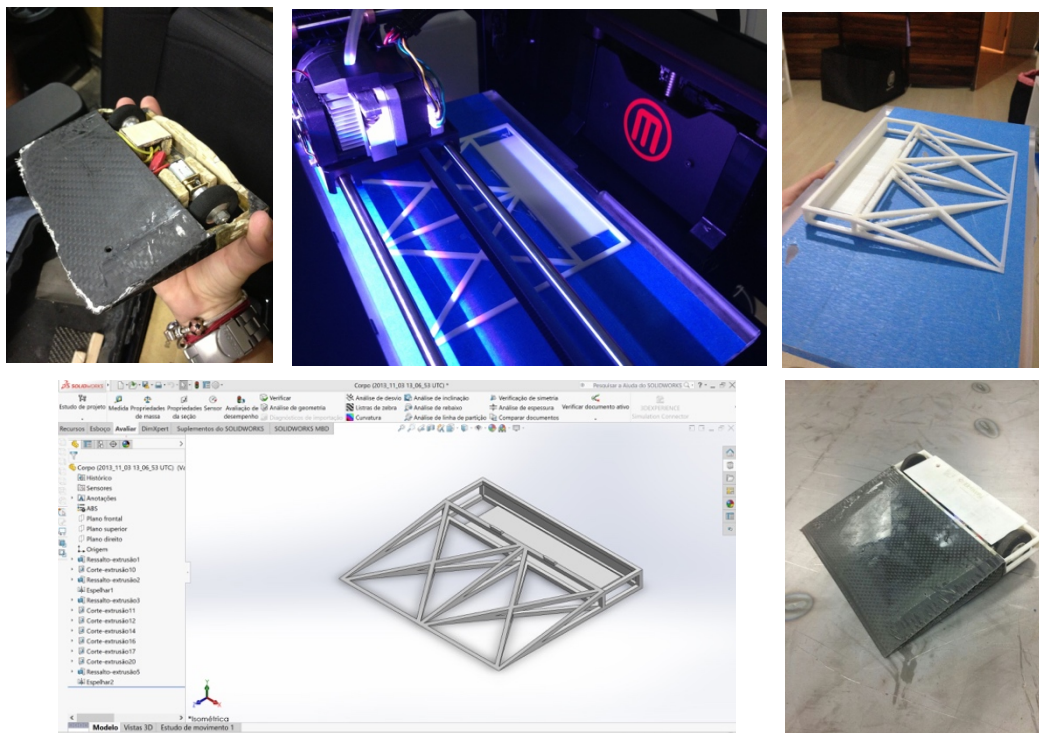


Figura87: etapas de desenvolvimento do novo projeto do robô Pocket. Fonte: autora.

Apesar de ganhar várias lutas foi eliminado, pois o chassi sofreu alguns danos e quebrou ao meio, seguro pelas placas de carbono. As tampas impressas (Figura 88) se mostraram frágeis e precisaram ser trocadas durante a competição. Mas a experiência mostrou que a impressão 3D no combate é promissora e pode ser usada para imprimir robôs completos e não somente peças e acessórios pequenos.



Figura 88: tampas impressas em PLA transparente. Fonte: autora.

A partir do projeto do Pocket, a busca para explorar as possibilidades que a manufatura aditiva poderia trazer para o combate continuaram. O próximo projeto foi para a competição nacional Winter challenge em 2015. O robô desenvolvido foi o Cronut para a categoria *Beetleweight*(1360g).

No Brasil o Cronut (Figura 89), um robô do tipo *rammer*, foi o primeiro a competir na categoria. “Esse tipo danifica o adversário se jogando contra eles ou empurrando-os contra as bordas da arena. Normalmente possuem um sistema de locomoção resistente, armadura robusta, alta resistência a impactos, e não possuem armas, e em geral são inversíveis (funcionam de cabeça para baixo).”⁵⁸



Figura 89: Cronut e sua estrutura impressa. Fonte: autora.

Como o PLA já tinha se mostrado frágil, o material escolhido foi o ABS. Sem o conhecimento de como seria a performance, foi pensado um pneu de cadeira de rodas como proteção externa do chassi, de modo a minimizar o contato da estrutura impressa diretamente com a arma dos adversários. Proteger a peça impressa com materiais mais resistentes é um ótimo recurso para minimizar os riscos de dano.

A impressora utilizada continuou sendo a Replicator 2 que não possui base aquecida para imprimir e por isso foi necessário usar discos de fixação (Figura 90A) para tentar evitar o empenamento da peça. Esse é um recurso do próprio software de fatiamento (Figura 90B) da máquina para ajudar na impressão de peças grandes ou materiais que tendem a empenar ou encolher.

⁵⁸ Retirado do tutorial Riobotz

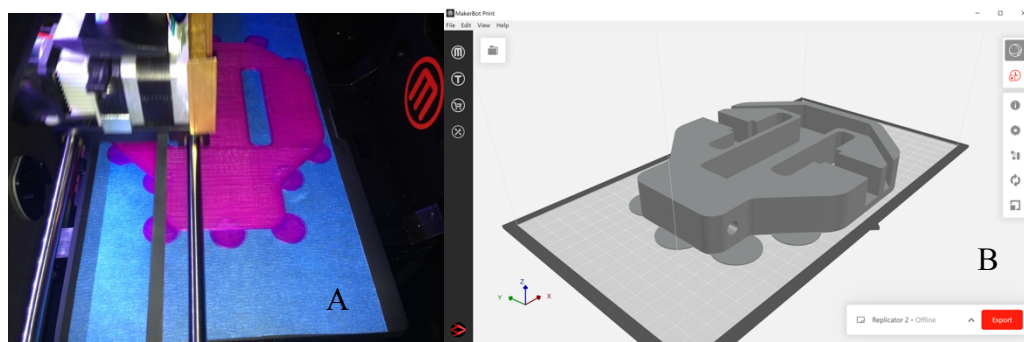


Figura 90: a) robô sendo impresso com os discos de fixação; b) programação da peça no software de fatiamento. Fonte: autora.

O empenamento e ou encolhimento (Figura 91) são problemas comuns na impressão 3D FFF, ocorrendo geralmente por causa da temperatura. Quando uma área da impressão esfria, ela se contrai. Essa contração leva ao encolhimento do material que está imprimindo. A contração também ocorre nas áreas periféricas, criando tensões internas. Se essas tensões forem altas, a peça irá deformar ou, em casos extremos, rachar. Uma espessura da parede constante pode reduzir a probabilidade de deformação, ou encolhimento assim como a impressão de peças em um ambiente com temperatura controlada. (REDWOOD; SCHOFFER; GARRET, 2017)

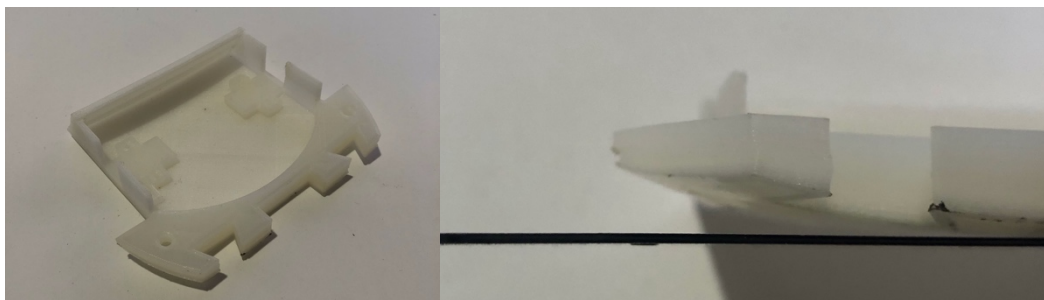


Figura 91: peça impressa em náilon empenada. Fonte: autora.

A solução de proteger o chassi foi acertada, pois não houve dano na estrutura na parte que o pneu o envolvia. O problema durante o combate foi o suporte da arma que não era protegido e continha um furo passante impresso na horizontal. Por ele passava um eixo de aço responsável por segurar a arma, um meio cano de aço feito para empurrar os adversários. A direção das camadas e dos furos foram feitos de modo erroneo e o furo não resistiu e se rompeu. Ele foi projetado no sentido transversal a construção de camadas, enfraquecendo mecanicamente a sua estrutura.

Para furos que vão suportar cargas de impacto (por exemplo, o furo que suporta o eixo da arma do Cronut) (Figura 92), a orientação correta no software de fatiamento é muito importante. Se for impresso horizontalmente, ele terá todas as fraquezas mecânicas das camadas sobrepostas, concentrando tensões e aumentando a probabilidade de quebra. Se o furo for orientado na vertical, no sentido de construção das camadas, será muito mais forte devido ao fato de ter linhas sólidas de plástico ao redor, distribuindo uniformemente as forças aplicadas.

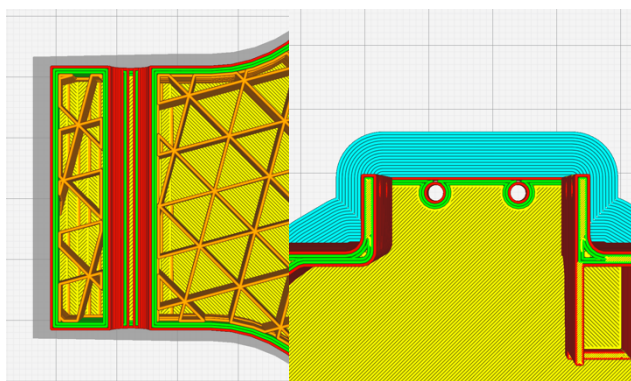


Figura 92: comparação de um furo impresso horizontalmente e um furo impresso verticalmente.
Fonte: autora.

A orientação da peça no software de fatiamento influencia diretamente na precisão, tempo de fabricação, resistência e acabamento superficial. Ratificando a importância do conhecimento sob a forma de construção de cada tecnologia. As camadas são mais fortes em algumas direções e mais fracas em outras, minimizar essas fraquezas de acordo o sentido é uma ferramenta essencial para criar peças fortes e resistentes.

5.2.1 Lumiere (150g)

O Lumiere (Figura 93) é um *vertical spinner* da categoria *Fairyweight* (150g) desenvolvido para a competição mundial *Robogames*⁵⁹ realizada na Califórnia (EUA) em 2018, na qual ganhou a medalha de prata. “*Spinners* são os robôs mais destrutivos que existem. Possuem uma lâmina, disco ou concha giratória que gira em alta velocidade. Em geral é impossível que os adversários os acertem sem serem atingidos pela arma.”⁶⁰

⁵⁹ RoboGames é a Olimpíada dos Robôs – na qual as melhores mentes de todo o mundo competem em mais de 50 eventos diferentes onde qualquer pode competir.

⁶⁰ Segundo o tutorial Riobotz.



Figura 93: Lumiere com a medalha de prata. Fonte: autora.

O chassi (Figura 94) foi modelado para ser impresso, e como precisava ser leve e resistente arma e rampa foram feitas em titânio. Na decisão de qual a tecnologia de impressão a ser usada, foi importante considerar as estruturas de suporte e como estas afetariam o resultado final, pois o design demandaria uma quantidade. A maioria das estruturas de suporte possuem um impacto negativo no acabamento da superfície, exigindo sua remoção ao final da impressão, resultando em manchas, rugosidade na superfície ou medidas imprecisas.

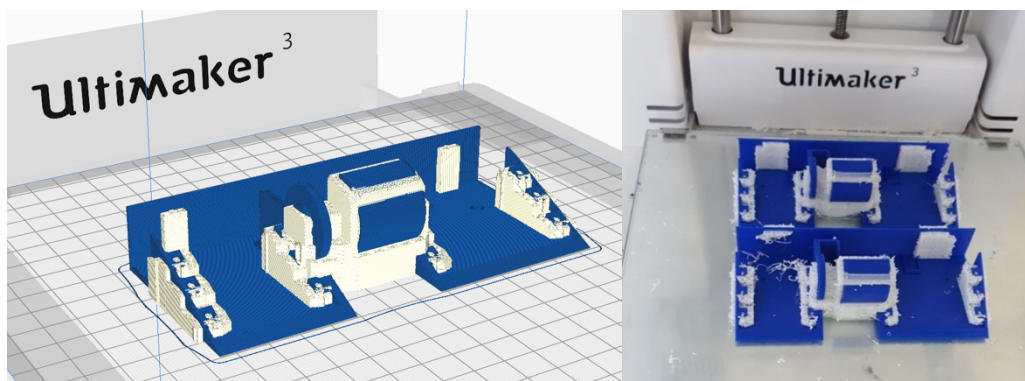


Figura 94: chassi com o suporte solúvel no software de fatiamento e impressos. Fonte: autora.

Com análise das opções, a impressora 3D escolhida foi a Ultimaker 3 da Ultimaker⁶¹, que possui duas cabeças de impressão, uma para o material principal; e outra para o suporte solúvel em água, o PVA⁶², permitindo um acabamento da superfície melhor onde ele está em contato com o material principal, e medidas precisas depois que dissolvido (Figura 95).

⁶¹ A Ultimaker é uma empresa de fabricação de impressoras 3D com sede na Holanda fundada em 2011, com escritórios e linha de montagem nos EUA.

⁶² PVA é uma abreviação de álcool polivinílico, um material solúvel em água.

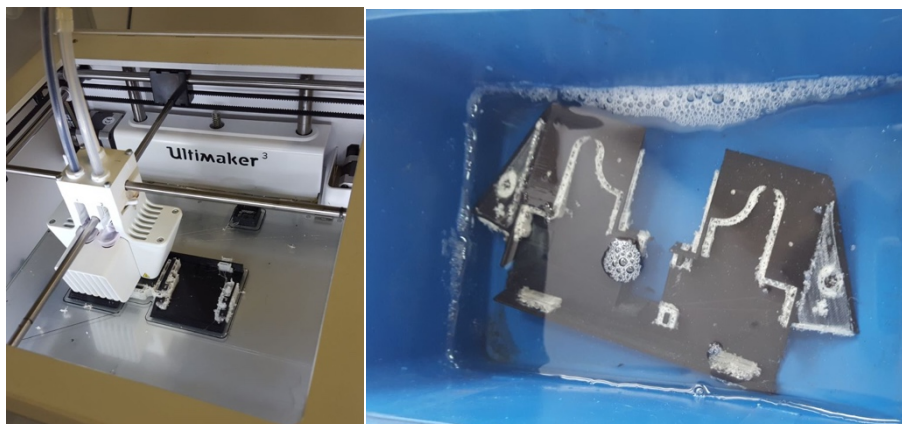


Figura 95: chassi sendo impresso e posteriormente submerso em água para dissolução do suporte.
Fonte: autora.

O processo de desenvolvimento do Lumiere contou com várias versões (Figura 96), tanto virtualmente no programa de CAD Solidworks, quando no mundo real. A medida que sofria alterações significativas, as peças eram impressas com diferentes materiais e testadas. O projeto foi aperfeiçoado durante dois meses antes da competição, com diversos protótipos e testes e, desse modo foi possível criar um robô competitivo que chegasse na final ultrapassando mais de 30 inscritos.

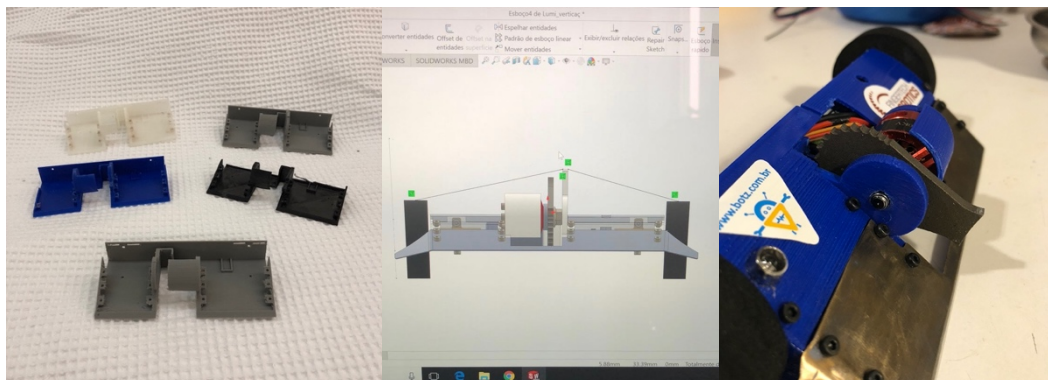


Figura 96: processo de desenvolvimento do projeto. Fonte: autora.

Um dos materiais testados foi o náilon⁶³, considerado um dos plásticos mais resistentes para impressão FFF. Ele tende a dobrar e deformar em vez de quebrar quando é atingido o que pode ser muito útil no combate. Essa característica vantajosa, pode se tornar negativa, pois a deformação pode ser maior que o necessário. O material não é rígido o suficiente para paredes finas, exatamente o que ocorreu com o Lumiere (Figura 97). Ele se mostrou muito flexível, mesmo com rampa de titânio adicionada na frente, impossibilitando seu uso em combate.

⁶³ O náilon é um nome genérico para a família das poliamidas, sintetizado pelo químico chamado Wallace Hume Carothers em 1935. Foi a primeira fibra têxtil sintética produzida.

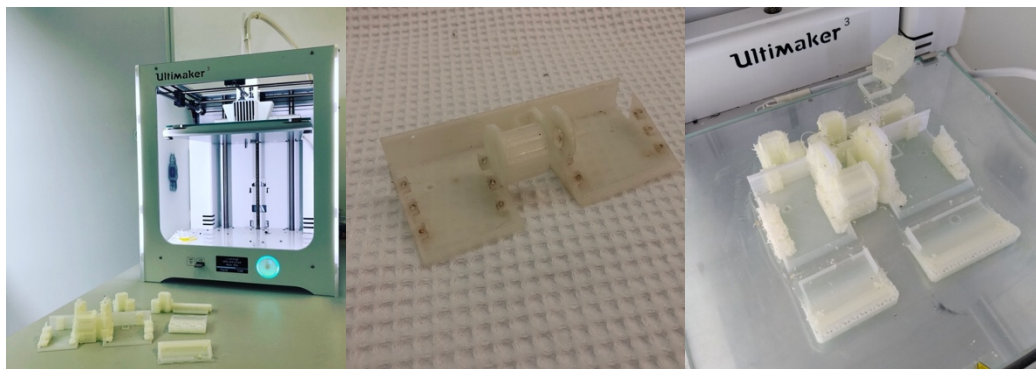


Figura 97: peças do Lumiere em náilon. Fonte: autora.

Além da sua flexibilidade, o náilon não é fácil de imprimir. É preciso uma extrusão com temperaturas acima de 240°C e nem todas as impressoras conseguem mantê-la por muito tempo sem queimar a cabeça. É altamente hidrofílico, absorvendo mais de 10% do seu peso em água em 24 horas. Se estiver úmido, e for aquecido a água no filamento explode transformando-se em vapor causando bolhas de ar durante a impressão, o que impede a boa adesão das camadas enfraquecendo a peça (Figura 98A)⁶⁴, ou impossibilitando sua impressão (Figura 98B).

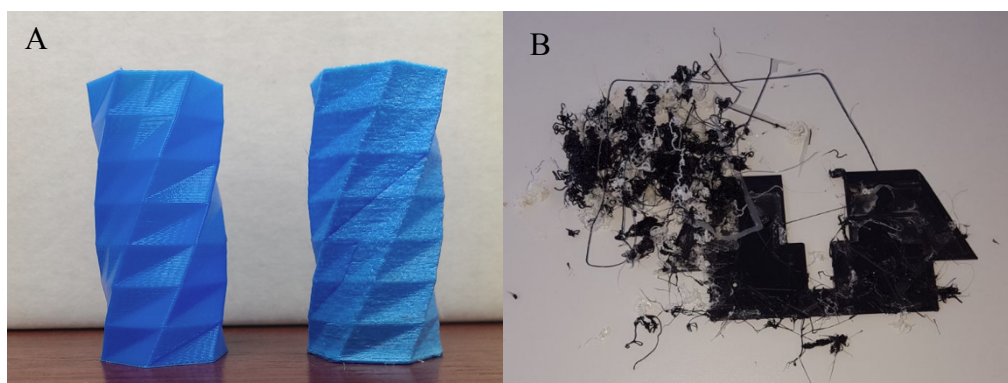


Figura 98: a) comparação de uma peça com náilon úmido e seco. Fonte: Matterhacks.; b): erro de impressão. Fonte: autora.

Para se obter uma boa qualidade de impressão com náilon e alguns outros filamentos é recomendando, a utilização de um forno ou estufa para secá-los inclusive durante a impressão. Já é possível encontrar equipamentos específicos para este fim, como o secador de filamentos usado para os testes da empresa Printdry⁶⁵ (Figura 99). Após a secagem o ideal é armazenar em um recipiente hermético para que os materiais permaneçam livre de umidade e conservem suas características por mais tempo.

⁶⁴ Disponível em: <https://www.matterhackers.com/articles/printing-with-nylon>

⁶⁵ Disponível em: <https://www.printdry.com/product/printdry-filament-dryer/>



Figura 99: secador de filamento. Fonte: Printdry.

Devido a restrição de peso e tamanho, as tampas e os suportes dos motores também foram modelados (Figura 100) para atender as necessidades do Lumiere. Como o peso da categoria é baixo, as soluções que a MA traz com a customização das peças é de suma importância para a manutenção das especificações exigidas o que não seria plausível na manufatura tradicional.

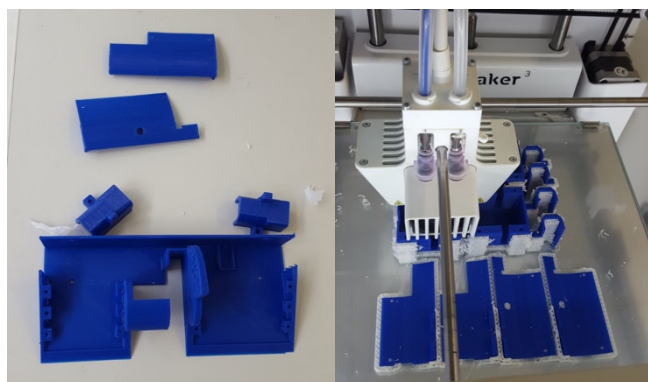


Figura 100: chassi, tampas e suportes de motores impressos. Fonte: autora.

Para aumentar a resistência e a rigidez foi realizado um pós-processamento de acordo com o tutorial disponível online⁶⁶: o tratamento térmico (Figura 101). A peça foi colocada em um forno caseiro para que as cadeias de polímero do plástico se aquecessem e relaxassem as tensões de resfriamento irregular da impressão o suficiente para evitar deformações. O resultado foi uma peça até 40% mais forte e até 25% mais rígida do que uma saída diretamente da impressora.

⁶⁶ Disponível em: <https://rigid.ink/blogs/news/how-to-anneal-your-3d-prints-for-strength>.



Figura 101: peças tratadas em forno caseiro. Fonte: Rigidink

Como o tempo até a competição era escasso, e o resultado dos experimentos com filamentos além do PLA não foram satisfatórios, foram impressos com este material ao menos 3 conjuntos de chassis, tampas e suportes de motores, que, conforme a necessidade, eram trocadas nos intervalos das lutas. O Lumiere terminou destruído (Figura102), mas resistiu até a final graças as peças reservas.

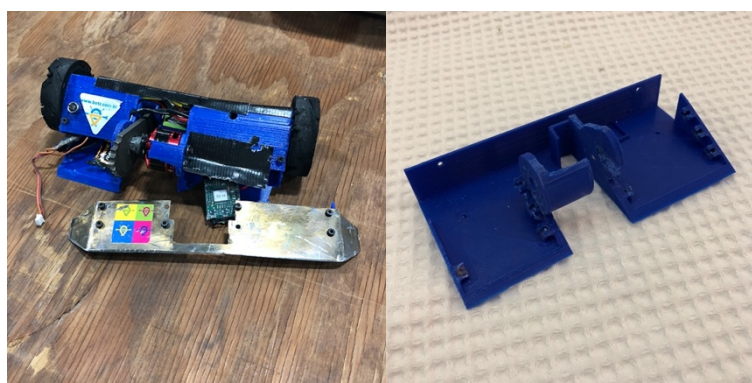


Figura 102: Lumiere destruído após competição. Fonte: autora.

As possibilidades que a MA traz são uma das grandes responsáveis pelo crescimento da categoria *Fairyweight*, pois assim como Lumiere que não poderia ser feito usando manufatura tradicional, outros robôs também não. A título de curiosidade na competição Hackcombot 2019 dos 14 robôs inscritos 10 usavam impressão 3D no projeto.

5.2.2 Donut (456g)

O *Donut* é um robô do tipo *rammer* da categoria *antweight*(456g) e foi inspirado no Cronut, dissertado anteriormente. Ele foi desenvolvido em 2015 para

a competição nacional Winter Challenge e, desde então, sofre mudanças após as competições. A impressão 3D foi de grande valia nesse processo, pois sua evolução vai além do design, perpassando também por componentes, materiais e tecnologias utilizadas.

O primeiro pneu idealizado (Figura 103) foi de carrinho de corrida em escala, porém este não se mostrou viável quando o chassi foi impresso, pois os componentes internos não couberam.



Figura 103: primeira versão do *Donut*. Fonte: autora.

Após algumas buscas, chegou-se a um pneu pequeno e flexível o suficiente para comportar todos os componentes internos com folga e ficar no peso da categoria. Por conta da facilidade de impressão e a falta de tempo, o material escolhido foi o PLA (Figura 104), mesmo não sendo o ideal para combate.



Figura 104: chassi do *Donut* impresso em PLA. Fonte: autora.

Tendo em vista a fragilidade do material, foi adicionada uma bucha em torno do furo que apoia o eixo, ao invés de deixá-lo em contato diretamente com o plástico, espalhando assim a força dos impactos por uma área maior, e diminuindo a probabilidade de danos na estrutura.

Passada a competição foram testados outros materiais. O náilon, como já dito, se tornou popular entre aqueles que queriam peças mais resistentes, mas não é um material fácil de se trabalhar. Isso fez com que fabricantes buscassem novas opções utilizando-o como base para filamentos compostos. Um dos mais populares atualmente é o náilon CF. A adição de pó fibra de carbono (cerca de 20%) ao náilon o torna mais forte, mais rígido e menos propenso a deformação durante a impressão, mantendo sua durabilidade e resistência. Ele ainda precisa ser impresso em altas temperaturas para que as camadas delaminem e quebrem facilmente. A impressão não pode ser muito rápida para evitar fios na peça (Figura 105), o que ocorre geralmente devido ao vazamento de plástico do bico enquanto a extrusora se move de um ponto ao outro.

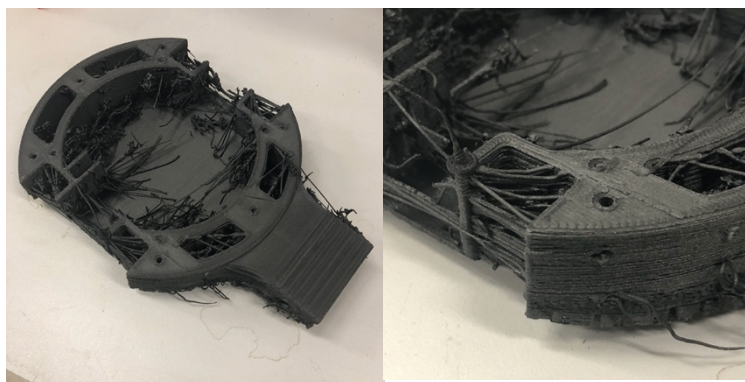


Figura 105: chassi do Donut impresso em náilon CF com fios. Fonte: autora.

Seu custo é elevado, podendo ser até seis vezes mais caro do que um filamento de PLA. Por ser bastante abrasivo foi preciso trocar o bico para um de aço endurecido (Figura 106). para não desgastar o furo do bico de latão presente na maioria das impressoras 3D, inclusive na Replicator 2, utilizada para impressão desse protótipo.



Figura 106: bicos em latão, inox e temperado. Fonte: Matterhacks

O teste não foi bem-sucedido e o chassi não pôde ser utilizado. Outras alternativas foram avaliadas, e inspirado na característica do pneu externo que protege o Donut, foi cogitado o filamento de borracha para impressão da estrutura por ele ser flexível e ter excelentes propriedades mecânicas. O primeiro utilizado

(Figura 107) não foi satisfatório com relação a flexibilidade, pois ficou rígido como o PLA.

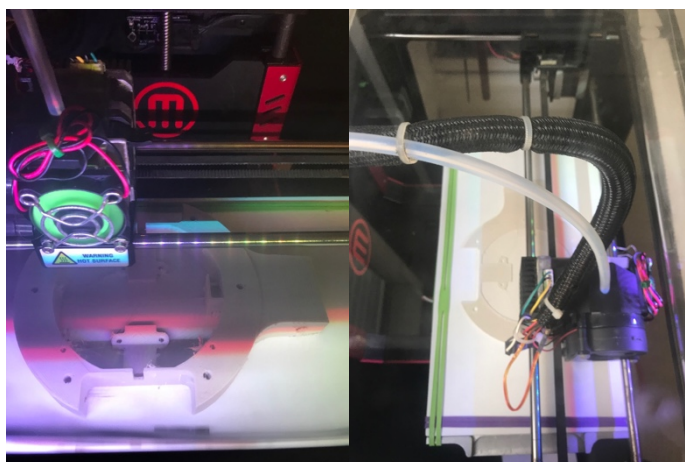


Figura 107: chassi do Donut sendo impresso em material flexível. Fonte: autora.

Na busca pelo melhor filamento de TPU⁶⁷ foi encontrado o Cheetah⁶⁸: flexível, e fácil de imprimir (Figura 108). A principal característica deste material é a capacidade de ser utilizado em todos os tipos de impressoras 3D FFF nas velocidades já usadas para ABS e PLA, o que não é comum para outros materiais flexíveis que devem ser impressos lentamente. Possui uma dureza 95A shore, resistência significativa ao impacto, chegando a 84% maior que o ABS, e até 40% mais resistente à abrasão.

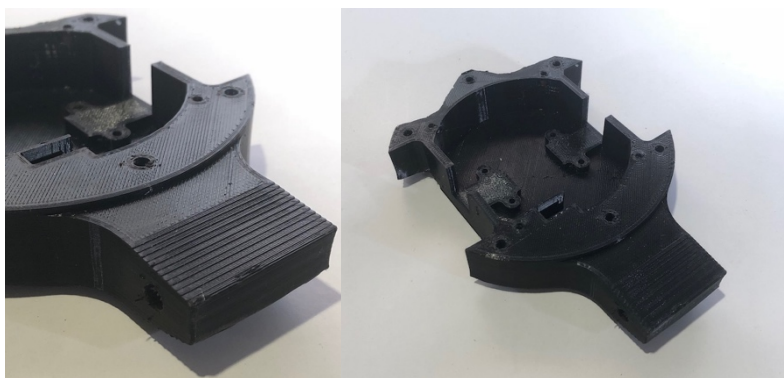


Figura 108:chassi do Donut em Cheetah™. Fonte: autora.

O Cheetah™ possui excelentes propriedades para combate, e para não o deixar tão flexível o chassi foi impresso com 100% de preenchimento, fazendo com que ficasse acima do peso da categoria. Por isso foi preciso cortar parte da estrutura manualmente para redução. O Chassi não sofreu nenhum dano na competição que

⁶⁷ Poliuretano Termoplástico (TPU)

⁶⁸ Cheetah é uma marca registrada da empresa Ninjatek. Marca que produz materiais especiais para usuários finais no espaço industrial de manufatura aditiva da Fenner Drives.

participou (Figura 109), mas o robô foi eliminado pois os motores não tinham força suficiente para empurrar seus adversários.

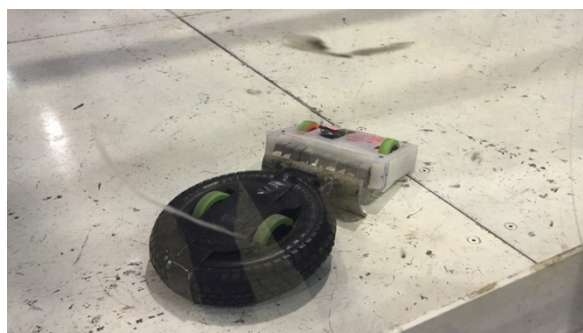


Figura 109: Donut em combate. Fonte: autora.

Visando melhorar o Donut para futuras competições, o chassi foi redesenhado para novos motores com uma redução maior e mais força para empurrar. A impressão foi em náilon e realizada na Ultimaker 3, pois o Cheetah™ não estava mais disponível. A impressora possui mesa de vidro aquecida (Figura 110B) para a fixação da peça foi utilizado uma cola spray da Cliever⁶⁹ (Figura 110A) para evitar empenamento e deslocamento da impressão. A peça foi impressa corretamente e já foi usada em 3 competições sem nenhum dano na estrutura.

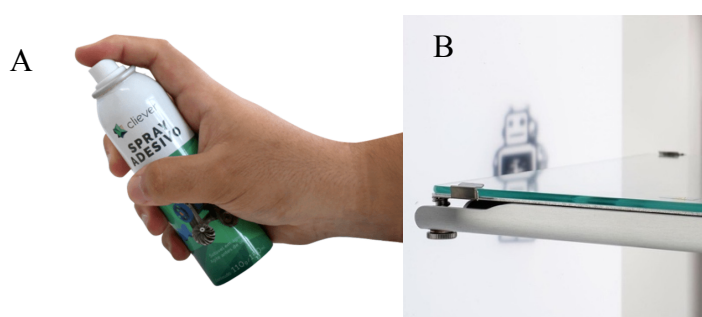


Figura 110: a) cola em spray para impressão. Fonte: Cliever; b) mesa aquecida da Ultimaker 3. Fonte: Ultimaker.

O Donut passou por diversas mudanças (Figura 111) em 4 anos, desde a sua primeira competição em 2015. Nunca conquistou um título, mas contribuiu para a inovação da MA no combate brasileiro.

⁶⁹ Disponível em: <https://store.cliever.com/acessorios/spray-p-impressao-cliever-150ml-100g/>



Figura111: Donut em náilon e suas outras versões. Fonte: autora.

5.2.3 Sun Tzu (456g)

O Sun Tzu (Figura 112) nasceu em 2015 juntamente com o Donut, para estreitar na competição Winter Challenge. Sua primeira versão era um *vertical spinner* da categoria *Antweight*(456g).

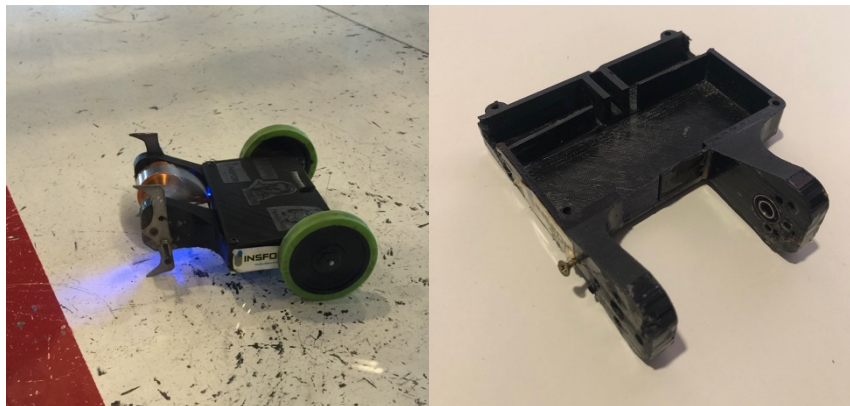


Figura 112: primeira versão do Sun Tzu. Fonte: autora.

Seu chassi foi impresso na Replicator 2 em PLA, pois na época era o que estava disponível. Como ele já tinha sido testado em combate e seu desempenho foi insatisfatório, foi utilizado XTC-3D⁷⁰ no pós-processamento para melhorar a resistência. O produto é aplicado como resina de revestimento protetor (Figura

⁷⁰ Disponível em: <https://www.smooth-on.com/product-line/xtc-3d/>

113). e preenche as lacunas das camadas criando um acabamento suave e de alto brilho protegendo a peça. Essa solução ajudou o robô a resistir até o término da competição, apenas com pequenos arranhões e lascas na estrutura.



Figura 113: revestimento XTC-ED e aplicado no chassi. Fonte: autora.

O Sun Tzu passou por mudanças no decorrer do tempo e seu design foi redesenhado, seguindo a tendência do combate, com robôs modulares. As armas podem ser trocadas rapidamente nos intervalos das lutas aproveitando o melhor de cada uma de acordo com o adversário. Alguns acessórios podem fazer muita diferença nas lutas, e há até acessórios específicos para usar contra um determinado robô. No entanto não é fácil fazer armas eficientes que possam ser desmontadas e montadas rapidamente, e a impressão 3D traz facilidade de produção para essas peças variadas (Figura 114).

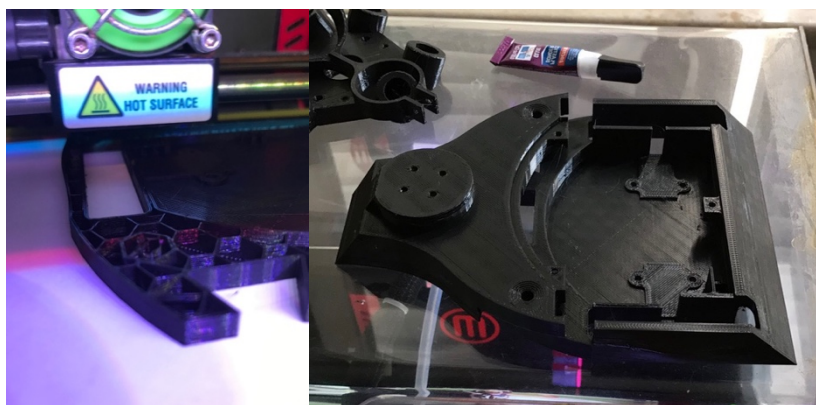


Figura 114: peças impressas do SunTzu Fonte: autora.

No novo projeto foi modelada uma base (Figura 114), onde ficam os componentes internos e a locomoção. Nela é possível encaixar diferentes frentes, fixadas com dois parafusos passantes entre as partes. Cada impressora é única e como as impressões tendem a preencher um diâmetro final menor do que o projetado, e preciso experimentar as tolerâncias de diâmetro dos furos, pois os

parafusos devem atravessa-los com facilidade. Inicialmente as bases foram impressas em PLA na Replicator 2.

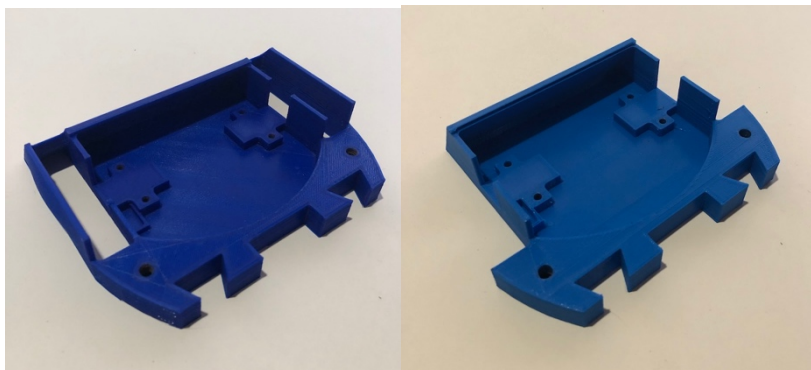


Figura 115: base em PLA Fonte: autora.

As frentes podem ser as mais variadas possíveis, desde que tenham o mesmo encaixe. Foram projetadas inicialmente 3 tipos de arma: *hammer* (Figura 116A), *vertical spinner* (Figura 116B), e *horizontal spinner* (Figura 116C).

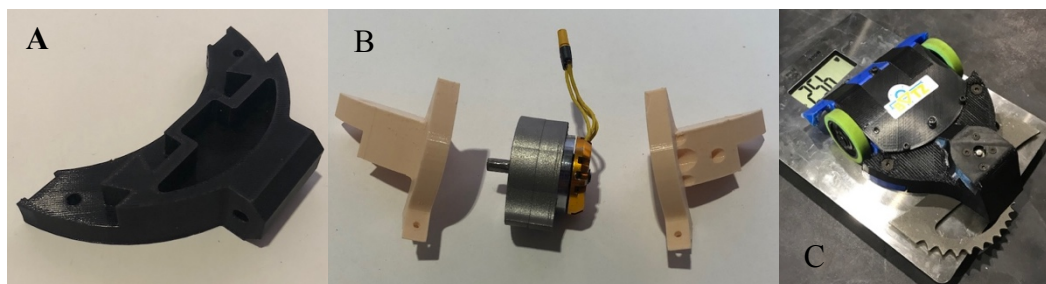


Figura 116: a) frente *rammer*; b) frente *vertical spinner*; c) frente *horizontal spinner*. Fonte: autora.

A *rammer* foi impressa com o Cheetah™, e projetada para operar com os meios canos do Donut. Ela foi usada apenas uma vez sem nenhum problema em combate, até pelo fato do Donut já ter sido testado com a mesma configuração e ter sido bem-sucedido.

Para fins de experimentação foi impresso o protótipo do *vertical spinner* em PLA, e o tambor em metal inox (Figura 117). A impressão foi realizada na PUC-Rio utilizando a tecnologia SLM. O motor foi modelado para encaixar um motor *brushless outrunner*⁷¹ no seu eixo, que seria responsável por girá-lo em alta velocidade. Esse conjunto não foi testado em combate, pois o inox é mole e precisaria ser temperado para que o intento de bater nos adversários fosse alcançado, precisando ainda de mais tempo para desenvolvimento.

⁷¹ Motor sem escova em que a parte externa gira.

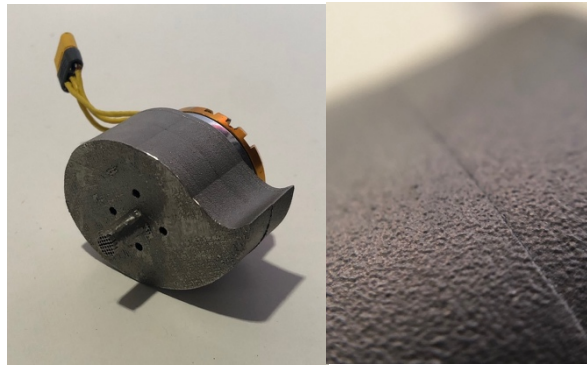


Figura 117: tambor impresso em metal inox. Fonte: autora.

Contudo a frente pela qual o Sun Tzu ficou realmente conhecido foi a do *vertical spinner*. A impressão 3D de peças, como em um robô modular, abre oportunidades de composição de diferentes materiais, como nesse caso, com a combinação da base rígida e a frente flexível. A peça frontal da arma foi impressa em Cheetah™ para absorver e dissipar pancada e, a base em PLA para ser rígida (Figura 117A). A frente flexível (Figura 118B) foi aprovada, visto que só sofreu arranhões cosméticos, mas a base quebrou (Figura 118C), pois, o material, como já sabido não era o ideal. O Sun Tzu ficou em 10º lugar de 24 robôs inscritos.

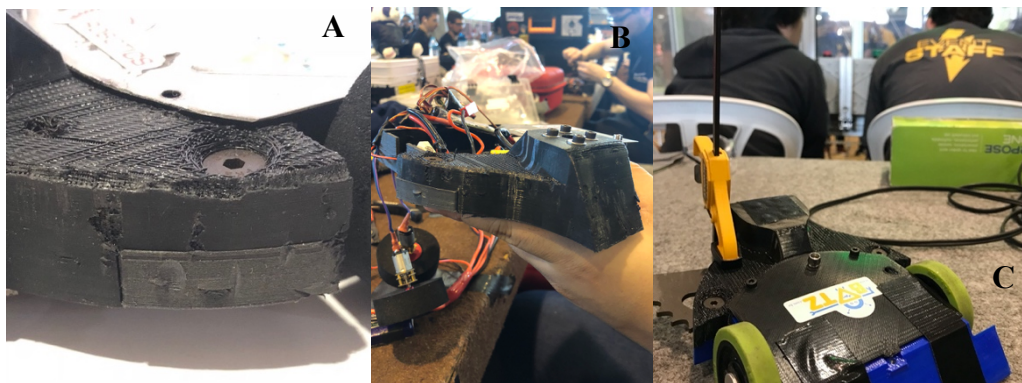


Figura 118:a) encaixe da base rígida e frente flexível; b) frente flexível; c) base quebrada.
Fonte: autora.

O projeto foi um sucesso, e gerou muita curiosidade das pessoas, pelo seu design modular inovador e a utilização da MA para fabricação das peças. O que precisou ser melhorado e impresso novamente para a futura competição foi a base, só que dessa vez náilon CF na Ultimaker 3 (Figura 119).

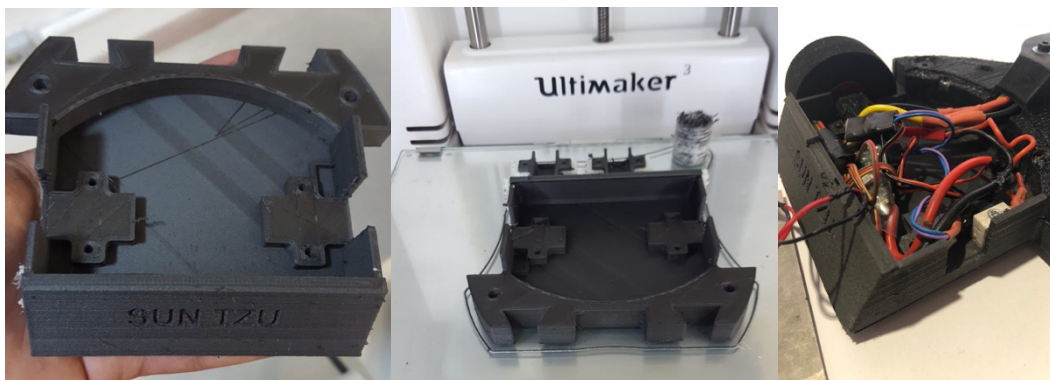


Figura119: base do Sun Tzu sendo impressa e finalizada em náilon CF. Fonte: autora.

O projeto já bem-sucedido, ficou ainda melhor e pode-se dizer que foi a combinação perfeita, pois, foi o primeiro campeão da categoria totalmente impresso no principal campeonato brasileiro em 2018, dentre 42 robôs (Figura 120). O título coroa anos de experimentação, lutas, erros e acertos não só com o Sun Tzu, mas todos os robôs, que utilizaram a MA.

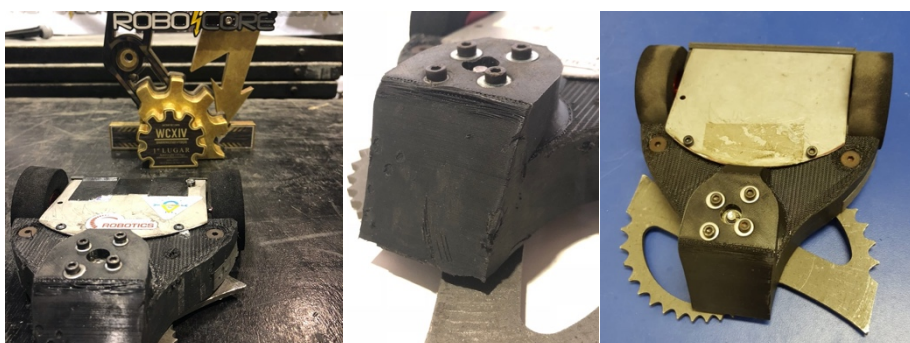


Figura 120: Sun Tzu na versão vencedora. Fonte: autora.

5.2.4 Fera (1360g)

O Fera é um *lifter* da categoria *beetleweight*(1360g). “Eles são robôs capazes de levantar o adversário, imobilizando-o ou virando-o de cabeça para baixo. Seu projeto envolve um mecanismo lento para levantar o oponente, que pode parar no meio do curso. Desse modo o *lifter* pode levantar um robô adversário e arrastá-lo pela arena ao invés de apenas capotá-lo.”

Com a experiência adquirida com a MA, e sabendo que ele poderia sofrer muitos danos, seu projeto foi desenvolvido para ser usinado usando o UHMW⁷²(Figura 121), devido a sua alta resistência a abrasão e ao impacto, uma

⁷² O UHMW é um polietileno de alta densidade e altíssimo peso molecular variando entre 2 e 5 milhões.

das maiores entre os materiais plásticos conhecidos. Sua primeira competição foi no Brasil em 2017, na qual finalizou em 14º lugar.

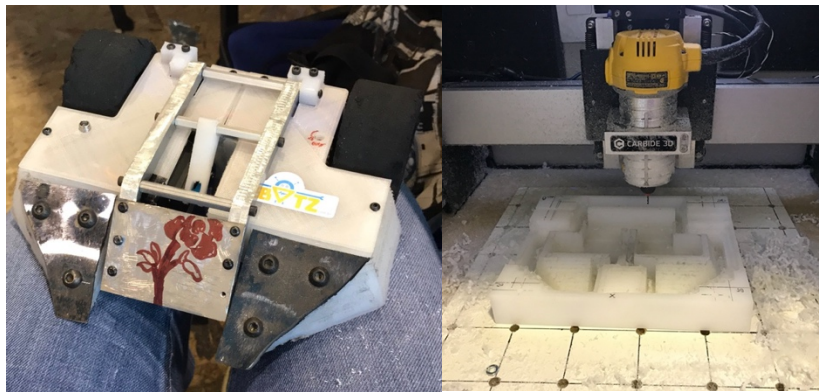


Figura 121: primeira versão do Fera e seu chassi sendo usinado. Fonte: autora.

Para a primeira versão do chassi (Figura 122B) foi usada a router CNC Shapeoko 3⁷³. Ao contrário da MA, para fresar são necessárias ferramentas especiais e um conhecimento prévio para programar o software (Figura 122A) com o caminho que a fresa deve seguir para retirar o material do bloco de plástico.

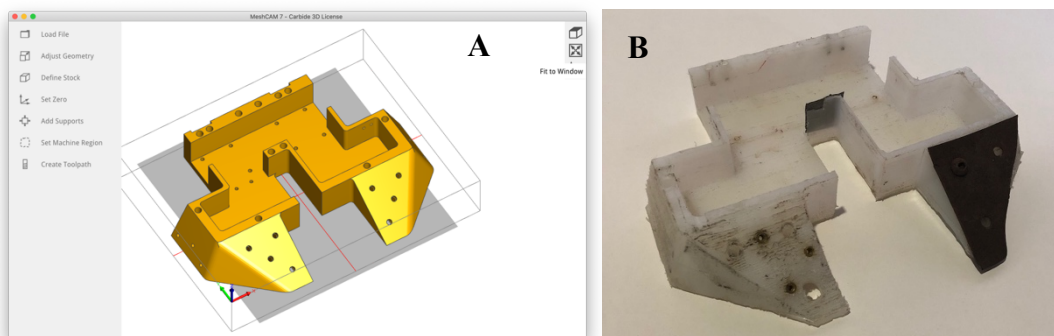


Figura 52: a) modelo no software da fresa; b) chassi usinado em UHMW. Fonte: autora.

Com o fim da competição, alguns componentes do Fera se mostraram frágeis e por isso o projeto foi redesenhado. Na segunda versão a MA foi uma ferramenta essencial no desenvolvimento, pois foi impresso um protótipo em escalada real do corpo e de todas as peças internas (Figura 123) para verificação e ajustes antes da usinagem.

⁷³ Disponível em: <https://carbide3d.com/shapeoko/>

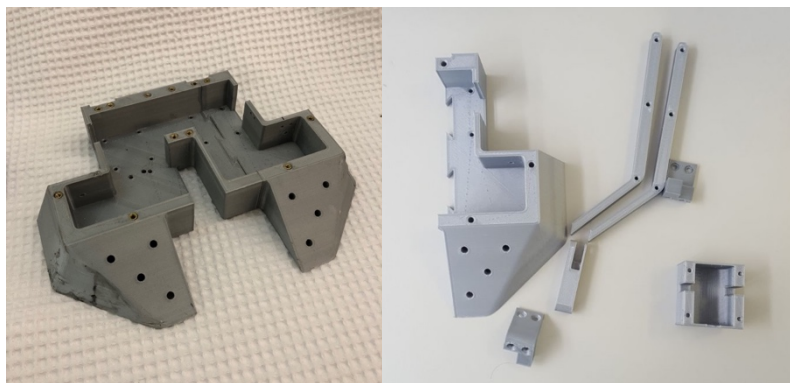


Figura 123: protótipo do Fera e seus componentes. Fonte: autora.

Por se tratar de um protótipo as configurações no software de fatiamento são importantes para se otimizar tempo e custos. Uma peça impressa com uma camada menor, terá uma superfície mais lisa e poderá produzir detalhes mais precisos com um tempo de impressão alto, o que não era necessário. A altura maior da camada (Figura 124B) significa que as peças são impressas mais rapidamente, com camadas mais visíveis na superfície e baixa precisão. Dessa forma, o protótipo foi impresso com uma camada de 0.3mm e 10% de preenchimento (Figura 124A).

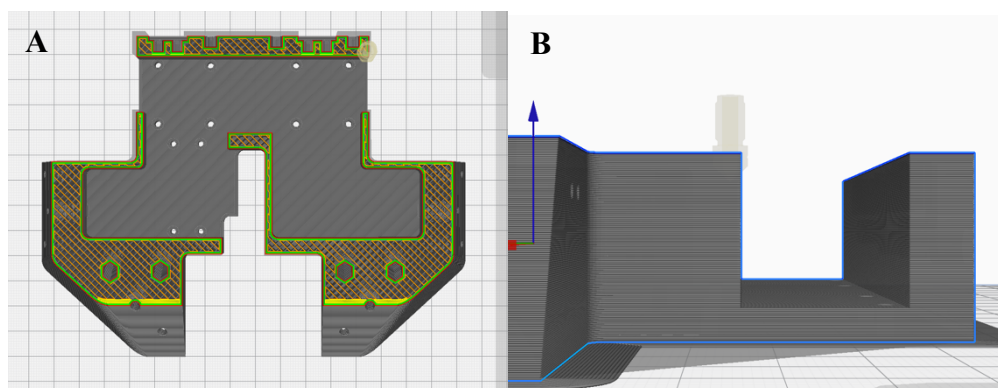


Figura 124: a) peça no software de fatiamento; b) camadas visíveis da impressão. Fonte: autora.

O Fera era maior que a bandeja de impressão da Ultimaker 3. Como solução foi utilizada a técnica de segmentação que consiste em dividir a peça em sub-partes menores e imprimíveis. Para facilitar a montagem, foram modelados encaixes no formato dovetail (Figura 125) para o correto alinhamento. Após encaixadas as peças elas foram coladas com cianoacrilato(CA)⁷⁴ que age de forma rápida e pode torná-las razoavelmente forte.

⁷⁴ Cianoacrilato, é também conhecido por supercola ou super bonder. É um tipo de cola criada acidentalmente em 1942 por Harry Coover durante experiências visando à criação de um polímero transparente.



Figura 125: peças impressas e o encaixe dovetail. Fonte: autora.

O chassi do Fera é chamado de *unibody*, feito em peça única, com paredes, compartimentos internos e fundo integrados, não sendo necessário soldar ou aparafusar a estrutura, exceto para fixar os componentes e a tampa, tornando-o mais leve e resistente. Uma desvantagem desse tipo de estrutura é que não há como trocar apenas uma parte avariada, se o dano for grande é preciso trocá-la por uma nova. No design criar filetes (Figura 126A) foi um recurso primordial. As curvas apresentam mais resistência do que ângulos retos, reduzindo concentrações de tensões nos cantos e nas bordas. O raio dos filetes definido no CAD deve ser definido de acordo com broca de fresa (Figura 126B) a ser utilizada, pois seu diâmetro interfere na fabricação das peças.

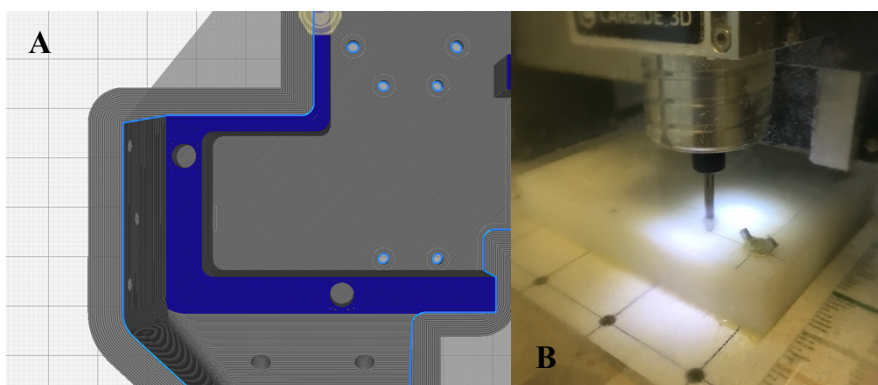


Figura 126:a) vista superior do chassi mostrando filetes; b) fresa em funcionamento Fonte: autora.

No Fera foi experimentado um novo material o Ultimaker *PC* (polycarbonato)⁷⁵, que é o mesmo dos usado nas arenas de combate por ser semelhante ao vidro, mas altamente resistente ao impacto e a chamas, ter boa estabilidade dimensional, boa resistência ao escoamento sob carga. É considerado um dos 3 plásticos mais importantes do mercado e está se tornando um material

⁷⁵ <https://ultimaker.com/materials/pc>

comum do dia-a-dia, como por exemplo na confecção de óculos. Suas características o tornam perfeito para a impressão de moldes, ferramentas, e protótipos funcionais.

Para os primeiros testes com o Ultimaker PC, foram impressos suportes do braço (Figura 127) que ergue os adversários, e ficam presos ao chassi por meio de 4 parafusos. Antes eles foram feitos manualmente de UHMW, mas ficaram as dimensões ficaram imprecisas, por isso foram substituídos pelos impressos e foram usados sem nenhum problema em combate.

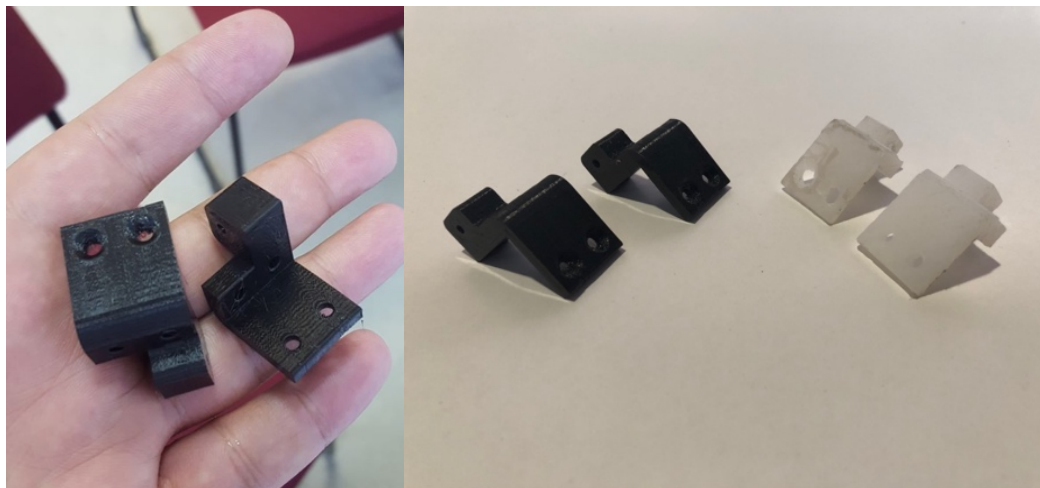


Figura 127: acessórios em Ultimaker PC e UHMW. Fonte: autora.

O protótipo do Fera foi impresso para ser funcional, ou seja, testado com seus componentes, para isso a utilização de parafusos para instalar os componentes é essencial. Projetar peças funcionais para impressão, independentemente da aplicação, com emprego de parafusos não é simples como em outros métodos de fabricação. Na MA, o mais comum é usar cola ou epóxis para unir as peças, porém, esse tipo de junção forma um vínculo permanente que não pode ser modificado posteriormente. Os parafusos criam, em alguns casos, uma ligação mais forte e permitem que as peças sejam ajustadas posteriormente. Em razão disso, foram desenvolvidas diferentes maneiras de implementá-los, tais como: insertos roscados, parafusos auto roscantes, buracos para porca, furos com rosca, e furo para fazer a rosca depois (Figura 128)⁷⁶.

⁷⁶ Disponível em: <https://formlabs.com/blog/adding-screw-threads-3d-printed-parts/>

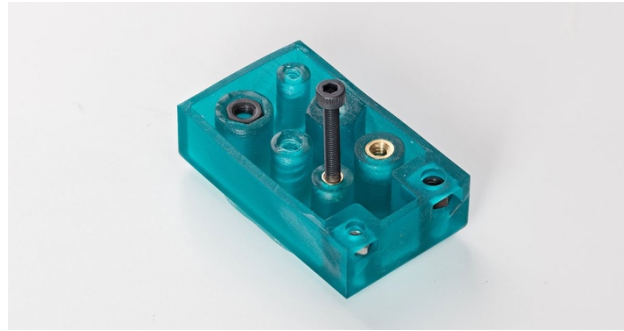


Figura 128: Peça exemplo dos métodos de fixação com parafuso. Fonte: Formlabs

No protótipo do Fera foi utilizado o inserto roscado (Figura 129) que precisa ser aquecido para instalação, ideais plásticos, mas pode ser encontrado também na versão para encaixe. Os insertos criam uma conexão forte e são fáceis de instalar. É necessário um furo guia na medida correta, que varia de acordo com o diâmetro do parafuso escolhido, neste caso o M3, em seguida, com um ferro de solda, lentamente é aplicada uma pressão empurrando o inserto para dentro do furo até a profundidade desejada. Esse tipo de inserto não pode ser usado em peças impressas com tecnologia SLA, que fletem, mas não derretem quando são aquecidas.

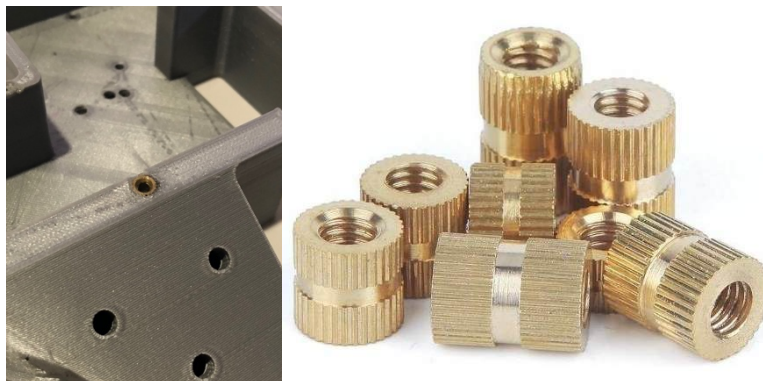


Figura 129: inserto roscado no chassi. Fonte: autora.

No CAD o método de fixação a ser utilizado e suas especificações já devem ser conhecidos, pois interfere diretamente no design a ser modelado. Paredes com espessura muito fina podem inchar e ficar distorcidas com a colocação do inserto.

Mesmo usinando o chassi com o UHMW, um plástico com excelente resistência a abrasão, foi necessário pensar em algo mais duro e afiado, para que fosse capaz de entrar por baixo dos adversários e resistir aos ataques sofridos. Por isso ele foi protegido por chapas de titânio cortadas e furadas manualmente com base no projeto CAD. O titânio possui propriedades mecânicas próximas do aço, porém com a metade da densidade, permitindo ter a mesma resistência com a metade do peso. É o melhor material quando se precisa construir algo com

restrições de peso e resistência, motivo pelo qual é amplamente utilizado no combate de robôs.

O titânio pode ser colorido sem tintas ou pigmento, somente usando técnica chamada anodização (Figura 130), que é “...um processo eletroquímico que visa formar uma camada de óxido na superfície de um metal. Esse filme formado estabiliza a superfície, impedindo que o material oxide ainda mais. A camada de óxido serve como um isolante elétrico e ainda pode ser utilizada para fins estéticos, ao ser pigmentada com cores.”⁷⁷ Assim pensando na estética, a técnica foi aplicada nas chapas, que ficaram azuis. A cor obtida pela eletrólise depende da tensão aplicada, que no Fera foi em torno de 10,0V.

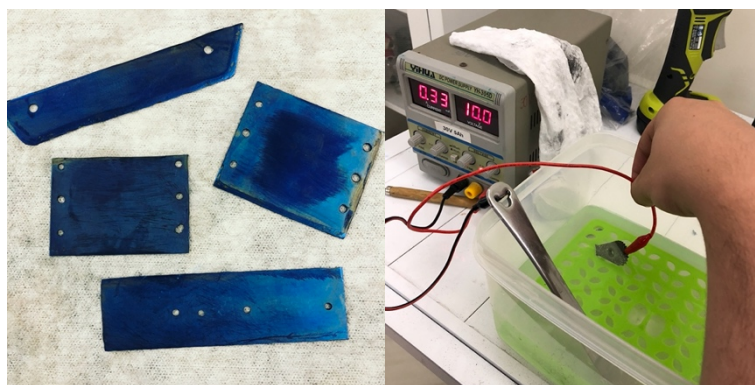


Figura 130: anodização em andamento e as peças finalizadas. Fonte: autora.

Em sua última competição no Brasil em 2018, ele ficou 5º lugar dentre 63 inscritos. Todas as modificações foram aprovadas e a MA foi de suma importância para o projeto ser robusto e funcional como deveria. Sem os protótipos (Figura 131) e as peças impressas dificilmente ele seria um projeto vencedor em tão pouco tempo.

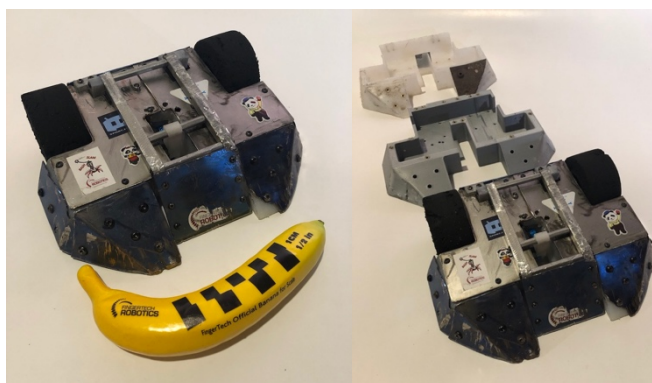


Figura 131: versões do Fera até chegar a atual. Fonte: autora.

⁷⁷ Disponível em: <http://engenheirodemateriais.com.br/2018/04/25/o-processo-de-anodizacao/>

5.2.5 Hannibal (1360g)

O Hannibal, é da categoria *Beetleweight*(1360g) e foi inspirado no Sun Tzu da categoria *Antweight*(456g) (Figura 132). Como um robô modular, sua configuração principal é um *horizontal spinner* e a secundária um *rammer*.



Figura 132: Hannibal e Sun Tzu Fonte: autora.

Sua primeira versão em 2017, assim como o Fera, foi desenvolvida para ser usinada em UHMW. Apesar de serem pequenos, nessa categoria os danos são grandes e um robô frágil não sobrevive por muitas lutas. Finalizado o projeto em CAD, foi impresso para verificação e possíveis ajustes no design, um protótipo (Figura 133) em escala real na Makerbot Z18, devido a sua área de impressão ser grande o suficiente para comportar peças sem nenhum tipo de corte na estrutura.

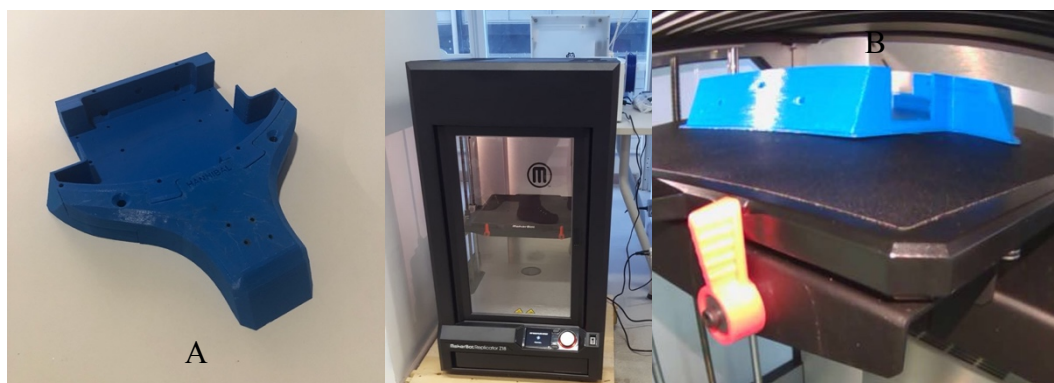


Figura 133: protótipo do Hannibal em PLA e a Makerbot Z18 Fonte: autora.

As partes foram fresadas (Figura 134B), porém, a frente do *spinner* não pôde ser utilizada, pois a usinagem ficou imprecisa. A solução foi imprimi-la em PLA (Figura 134A), e, para melhorar sua resistência, foi tratada com a resina XTC-3D, citada acima. A frente foi usada em combate e resistiu sem maiores problemas, ficando somente com danos estéticos.



Figura 134: a) chassi em PLA resinado; b) chassi fresado em UHMW. Fonte: autora.

Os suportes dos motores (Figura 135), também em PLA, não receberam nenhum tipo de pós-processamento. Eles não resistiram, e quebraram com os impactos, mas acredita-se que não foi pelo material escolhido, e sim pelo design. Os parafusos prendiam apenas um lado do suporte, e os ressaltos não tiveram estrutura suficiente para aguentar as cargas.

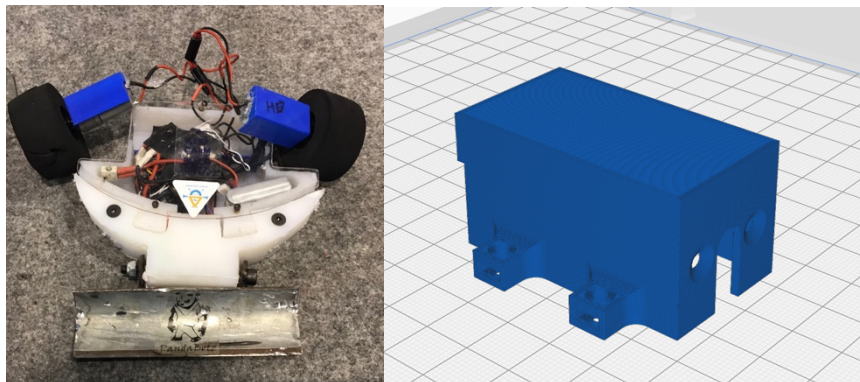


Figura 135: *Hannibal e Sun Tzu* Fonte: autora.

Seu desempenho no Winter Challenge 13º ed. não foi satisfatório, o projeto não foi fabricado corretamente e a destruição foi inevitável. Porém, com os erros, veio o aprendizado e uma segunda versão (Figura 136) foi planejada, dessa vez para ser totalmente impressa, mesmo que isso significasse sua destruição.



Figura 136: *Hannibal e Sun Tzu* Fonte: autora.

Compreender as forças aplicadas no combate permite definir uma percentagem de preenchimento próxima do ideal, um ajuste importante para o êxito ou não do robô, pois a força de uma peça está diretamente relacionada com o preenchimento, apesar da relação entre a percentagem e força não ser linear. “O preenchimento de 50% em comparação com 25% é normalmente 25% mais forte, enquanto uma mudança de 50% para 75% aumenta a resistência da peça somente em 10%. (Figura 137)”⁷⁸

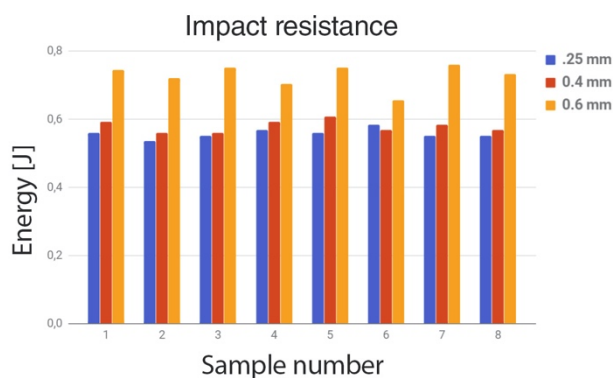


Figura 137: gráfico de . Fonte: Prusa.

Além da percentagem, pode-se definir também diferentes padrões, tais como grades, linhas, triangular, retangular, zigzag... Segundo estudo⁷⁹ o linear e a diagonal (linear inclinado a 45°) tendem a ser a opção mais forte.

Para economizar material e diminuir o tempo de impressão aumentando o preenchimento, o que deu mais força foi elevar o número de paredes externas (*Shells*) impressas em cada camada. Elas são o número de camadas na parte externa de uma impressão, sendo sempre as primeiras áreas impressas na camada. Quanto maior o número mais robusta é a peça.

⁷⁸ Disponível em: <https://blog.prusaprinters.org/everything-about-nozzles-with-a-different-diameter/>

⁷⁹ Disponível em: <https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/>

O primeiro material escolhido para aplicar na base do Hannibal os ajustes descritos acima foi o Ultimaker PC, por ser rígido, característica necessária nessa parte da estrutura, e ter se alcançado sucesso tanto na impressão quanto na usabilidade em combate. Ela foi impressa com 75% de preenchimento linear, suporte solúvel em PVA e 4 paredes de Shell (Figura 138).

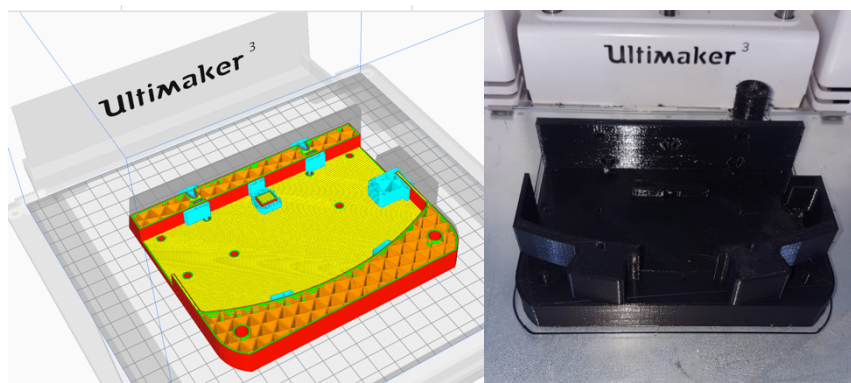


Figura 138: chassi do Hannibal em Ultimaker PC. Fonte: autora.

Para fim de testes, foi impresso também a base em náilon (Figura 139), contudo, não pode ser utilizada, devido ao empenamento ter impedido a colocação dos componentes.

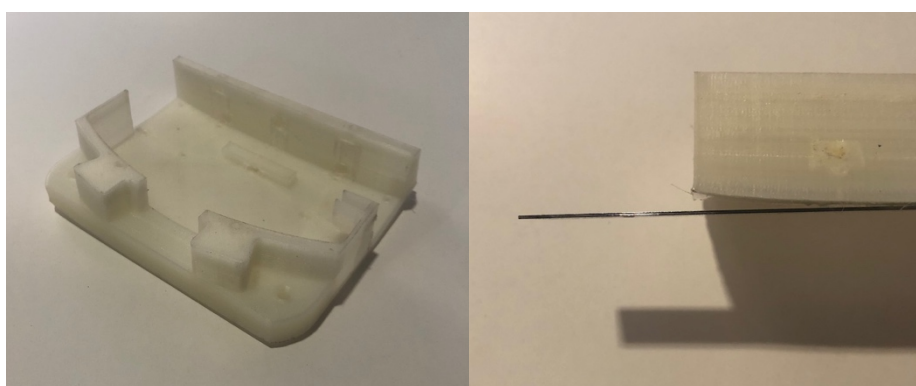


Figura 139: chassi do Hannibal em náilon. Fonte: autora.

Os conjuntos da arma *rammer* e *vertical spinner* se mantiveram como na versão anterior. Para a frente *rammer* foi escolhido o Cheetah™, já testado e aprovado (Figura 140).



Figura 140: frente *rammer* em Cheetah™. Fonte: autora.

Para a frente do *vertical spinner*, foram escolhidos 3 materiais: o Cheetah™ (Figura 141), o *nylon* CF (Figura 142) e o Ultimaker PC (Figura 143).

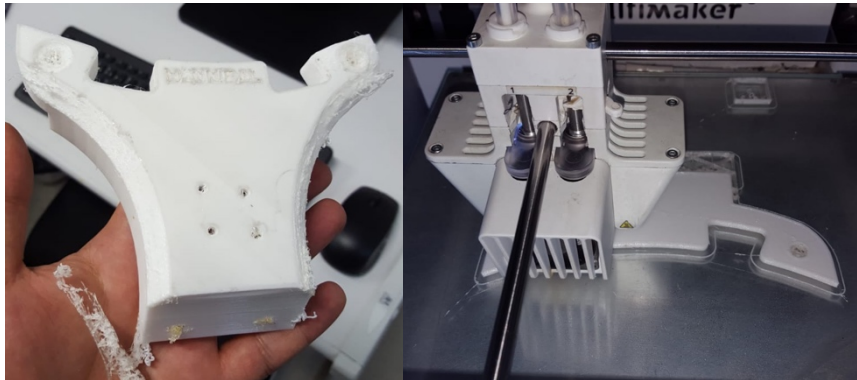


Figura 141: frente do vertical em Cheetah™. Fonte: autora.

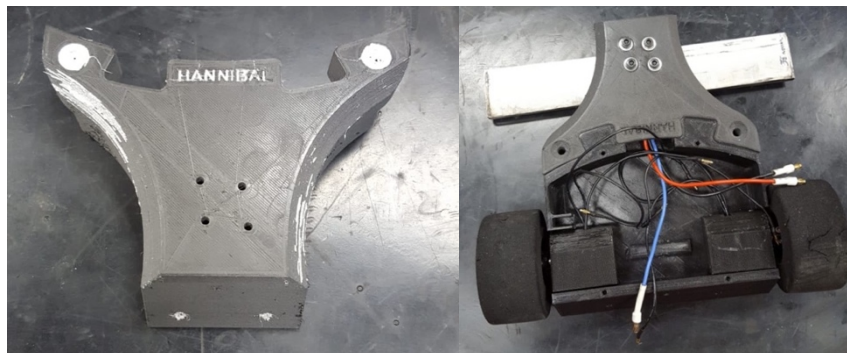


Figura 142: frente em náilon CF. Fonte: autora. Fonte: autora.



Figura 143: frente em Ultimaker PC. Fonte: autora.

A peça escolhida para combate foi a flexível, e para impedir que ela fletisse mais do esperado enquanto a arma estivesse acionada girando a lâmina em alta velocidade rente ao chão, foi necessário adicionar uma chapa de titânio de 2mm na frente (Figura 144), além da base rígida, que também ajuda nessa função. Com o tempo o material cumpriu sua função e não obteve nenhum dano significativo.



Figura 144: composição de material flexível e rígido no Hannibal. Fonte: autora.

No Hannibal, assim como nos outros estudos dissertados, para utilizar parafusos nas tampas e nos componentes internos, escolheu-se o método de cavidades na estrutura da peça na dimensão da porca, no qual as porcas são encaixadas, e se necessário coladas com cianoacrilato (CA) para não saírem (Figura 145). Para esse método as porcas quadradas, permitem uma maior força de torção do que as hexagonais, porém, independente da escolha ele é um dos mais eficazes, pode ser reutilizado, e o parafuso fica em contato direto com a porca.



Figura 145: cavidade na estrutura para a porca quadrada. Fonte: autora.

Ajustes no CAD e testes são necessários para determinar as medidas ideais da cavidade de acordo com cada impressora (Figura 146). Por isso foram impressas pequenas peças de teste para verificar as dimensões, economizando tempo e custos

de material com a Ultimaker 3. Outro ponto de atenção é com relação a orientação das cavidades para a aplicação e a direção das cargas. O eixo Z paralelo à impressão das camadas deve ser evitado, pois os componentes impressos são estruturalmente mais fracos nessa direção. Até 4-5 vezes a diferença na resistência à tração ao eixo XY, e o dobro na ruptura⁸⁰.

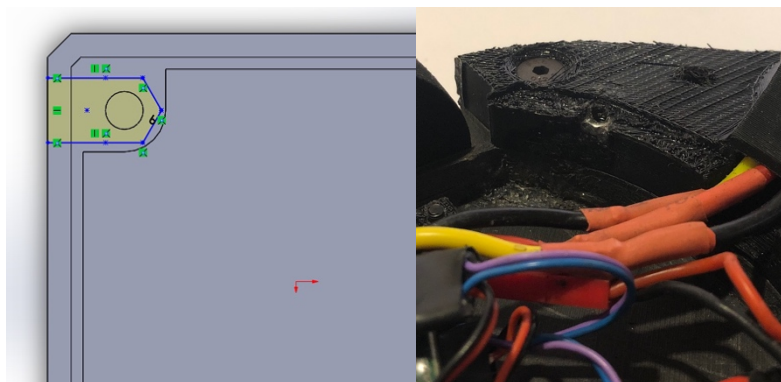


Figura 146: cavidade modelada no CAD e com a porca no robô. Fonte: autora.

Outra configuração importante que pode ajudar e muito a resistência da peça é a espessura da camada. A impressão de camadas mais finas em uma velocidade menor e uma temperatura mais alta, permite que mais calor seja transferido do bico, aquecendo assim a camada anterior e permitindo que a nova camada grude melhor na anterior, tornando as linhas extrudadas mais planas e aumentando a área de contato entre as camadas.

Embora a impressão com uma camada espessura pequena seja apropriada para a resistência, uma altura maior é mais adequada para resistência à tração. Esses dois fatores acabam trabalhando um contra o outro. Um modo de solucionar é fazer uso de um bico de maior diâmetro que permite imprimir uma altura de camada mais alta e maximiza a força em ambas as direções.

Segundo teste de resistência ao impacto⁸¹ realizado pela empresa Prusa revelou que os objetos impressos com o bico de 0,6 mm absorviam até 25,6% de energia mais do que aqueles impressos com o bico de 0,4 mm. E os objetos impressos com uma versão de 0,25 mm absorviam 3,6% menos energia do que os impressos com um bico de 0,4 mm.

80

⁸¹ Disponível em: <https://blog.prusaprinters.org/everything-about-nozzles-with-a-different-diameter/>

Como um bico com diâmetro maior não estava disponível para os testes, o suporte dos motores da locomoção redesenhados (Figura 147), para corrigir os problemas de design mencionados acima, foram impressos com camada de 0.1mm, e orientados na bandeja na vertical para o sentido das camadas ficarem perpendicular a força do parafuso quando presos no robô.

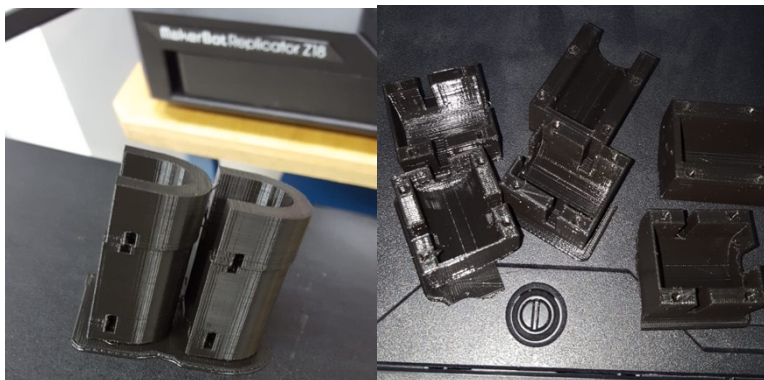


Figura 147: suporte motores. Fonte: autora.

Na competição de estreia do novo projeto com a estrutura totalmente impressa (Figura 148), em 2018, seu resultado foi satisfatório alcançando o 14º entre 63 robôs.



Figura 148: Hannibal no Winter Challenge em 2018. Fonte: autora.

O novo design do suporte, foi aprovado e não quebrou. A frente flexível, se mostrou novamente, um material excelente para seu propósito. A base sofreu algumas rachaduras, que foram consertados durante a competição com CA, mas se manteve inteira (Figura 149A). As derrotas vieram de uma falha mecânica na montagem da arma e não da estrutura. As escolhas no desenvolvimento se mostraram acertadas (Figura 149B), e provaram que a MA pode ser usada na categoria *Beetleweight* com sucesso.

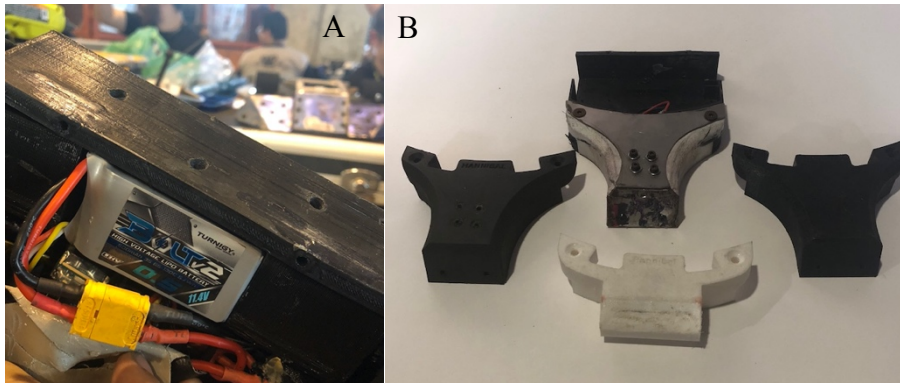


Figura 149: a) danos na estrutura da base; b) peças desenvolvidas para o Hannibal. Fonte: autora.

5.3 Conclusões

Depois muitas peças impressas, testadas e quebradas nas batalhas ao longo dos últimos anos, podemos concluir que é sim possível projetar e imprimir peças capazes de suportar as batalhas, mesmo em casa com uma impressora de pequeno porte. No combate, os robôs lutam em categorias por peso (Figura 150) e é importante que as escolhas corretas com relação ao design, material e tecnologia sejam feitas para cada peça nas diferentes escalas, de acordo com as necessidades. Quando os robôs sobem de categoria, é preciso estar preparado para forças destruidoras maiores.



Figura 150: robôs *Antweight* e *Beetleweight*. Fonte: autora.

Desde o início os robôs de combate são construídos em metal, com estruturas usinadas, e métodos de fabricação demorados. Mas com o avanço da MA, sua adoção no esporte foi questão de tempo o que permitiu projetar componentes leves e otimizados rapidamente. Novos adeptos são atraídos pela rapidez e facilidade de construção que ela traz, pois, um robô pode ser gerado em questão de horas. O

número de competições, participantes e robôs cresce exponencialmente no Brasil e no mundo (Figura 151).



Figura 151: Hackcomb0t 2019. Fonte: autora.

Para que os competidores tenham chances de ganhar utilizando métodos inovadores, é preciso projetar robôs robustos o suficiente para se defender, mas poderosos e leves o suficiente para atacar com velocidade e força.

Cada aumento na força de um objeto vem com um aumento correspondente no custo e no tempo de impressão, fatores estes que podem ser verificados e ajustados previamente. Encontrar o ponto em que é obtida força suficiente para a finalidade do objeto, mantendo o planejamento dentro de parâmetros aceitáveis, é o que se espera em qualquer projeto, seja para combate ou não. Para tal, o CAD é uma ferramenta essencial no processo. Trabalhar com um robô composto por muitas peças apresenta dificuldades sem um projeto bem estruturado. Detalhes das peças, conexões e montagem são informações essenciais de se saber antes do início da fabricação.

A escolha de componentes de alta qualidade é importante para garantir a resistência do robô sem ultrapassar seu peso limite. Escolher dentre os muitos disponíveis não é uma tarefa simples, e para isso é preciso conhecer suas propriedades, que quantificam as diversas características neles impostas.

Sempre há espaço para aprimoramentos e mudanças. A única maneira de aprender se o projeto de um robô funciona é dentro da arena. É esperado que durante as lutas componentes falhem sem um motivo aparente, durante as lutas. Os melhores robôs lutam, e ganham e perdem, e lutam, de novo, e são consertados e aprimorados, evoluindo o humano e a máquina. O aprendizado de construir um robô do zero, fazer testes, ir para uma competição não pode ser comparada a nenhuma leitura teórica (Figura 152). Nesse caminho erros e acertos fazem parte do processo.



Figura 152: processo de desenvolvimento. Fonte: autora.

A cada luta, se aprende algo novo sobre como os componentes se comportam quando são levados ao limite. É importante não apenas estar preparado para substituir partes se estiver danificado, mas melhorá-las o quanto antes. A MA está trazendo essa capacidade, os robôs não estão só mudando de estética, mas esta os tornando melhores.

Capítulo VI – Conclusões e Recomendações

Uma frase amplamente utilizada pode resumir o que a impressão 3D é para a manufatura, objeto de estudo dessa dissertação: “É uma revolução e não uma evolução” (AUTOR DESCONHECIDO).

O termo revolução industrial foi cunhado pela primeira vez em 1799 por Louis-Guilluame Otto⁸², um diplomata francês, que relatou em uma carta que o movimento estava em curso na França. Segundo Chris Anderson pode-se entender a revolução como:

“[...] em sua essência, a revolução industrial refere-se a um conjunto de tecnologias que ampliam drasticamente a produtividade das pessoas, mudando tudo, da longevidade e qualidade de vida para o local onde as pessoas vivem e quantas delas existem[...]em primeiro lugar, uma revolução na invenção. E não simplesmente um enorme aumento no número de novas invenções, mas uma transformação radical no próprio processo de invenção.” (ANDERSON, 2012)

A impressão 3D surgiu como uma tecnologia de prototipagem nos anos 80 e tem evoluído rapidamente desde então. Os desenvolvimentos contínuos das últimas décadas transformaram a manufatura aditiva em uma tecnologia mais acessível, capaz de se integrar a diferentes linhas de produção e até mesmo ser a própria “fábrica” para indivíduos. As possibilidades oferecidas são diversas, da prototipagem de produtos à integração na produção e à produção final. Sua adoção permite que as empresas se tornem fornecedoras diferenciadas, agregando valor por meio da otimização e customização de projetos, flexibilidade e agilidade na produção.

A tecnologia de manufatura aditiva ainda não está disponível para grande parte da população, mas não há dúvida de que essa tecnologia já ultrapassou barreiras e continuará ultrapassando. Esse caminho é longo, leva tempo, pesquisa e investimento. Empresas que utilizam a impressão 3D se tornam fornecedores diferenciados agregando valor por meio da otimização e customização de projetos, flexibilidade e agilidade na produção. Alcançando uma posição de liderança em seu setor e gerando mudanças internas importantes. Stephan Biller, chefe de manufatura da multinacional GE (*General Motors*) afirma: “Não há dúvidas[...], a manufatura

⁸² François Crouzet, *The Industrial Revolution in National Context: Europe and the USA*. (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996).

aditiva vai mudar a GE e vai mudar a produção como um todo[...]Eu não acho que as pessoas terão dificuldade em encontrar um emprego nesta área." (BILLER, 2014)

Por outro lado, temos os indivíduos ou *makers* que estão em suas casas e podem produzir seus próprios produtos, para atender a si mesmos ou a um certo micromercado. Em seu livro “A Cauda Longa”, Cris Anderson (2006), define:

Durante a maior parte do século passado, a escolha de produtos como filmes e livros eram cerceados pelas lojas físicas. Uma vez que esses produtos ficaram disponíveis on-line com “espaço de prateleira” ilimitado, o mercado de massa cultural se transformou em uma cauda longa de micromercados. As cadeias globais de suprimentos tornaram-se “livres de escala”, capazes de atender tanto os pequenos quanto os grandes. (ANDERSON, 2006)

Anderson discorre sobre o mercado online, mas sua teoria pode ser aplicada ao mundo dos objetos físicos ou átomos, como ele mesmo costuma colocar. A digitalização da fabricação terá um efeito disruptivo tão grande quanto em outras indústrias que se tornaram digitais, como fotografia, música, publicações e filmes. Os grandes fabricantes precisarão estar atentos, pois muito do que está por vir irá capacitar os indivíduos.

A manufatura aditiva oferece uma oportunidade única para produtos personalizados, ou específicos para certa destinação, independentemente da escala aplicada. A mesma oferece uma nova maneira de produzir novas geometrias, poucas ou uma unidade. Para avançar além da prototipagem, é requerido conhecimento, tanto das tecnologias e processos quanto do mundo digital, para a criação de arquivos tridimensionais que serão impressos.

Ao projetar, evite as fraquezas e enfatize os pontos fortes das peças impressas. Sempre que possível, alinhe os fixadores para comprimir as camadas, em vez de dividi-las para obter melhor resistência.

6.1 Potencialidades futuras

É difícil prever como será o futuro da impressão 3D, mas pelo que se depreende desse trabalho, continuará evoluindo de diversas maneiras, nas mais distintas áreas, muitas delas pouco conhecidas (além do que é esperado), com equipamentos mais rápidos e precisos, novos materiais, e novas aplicações (Figura 153).

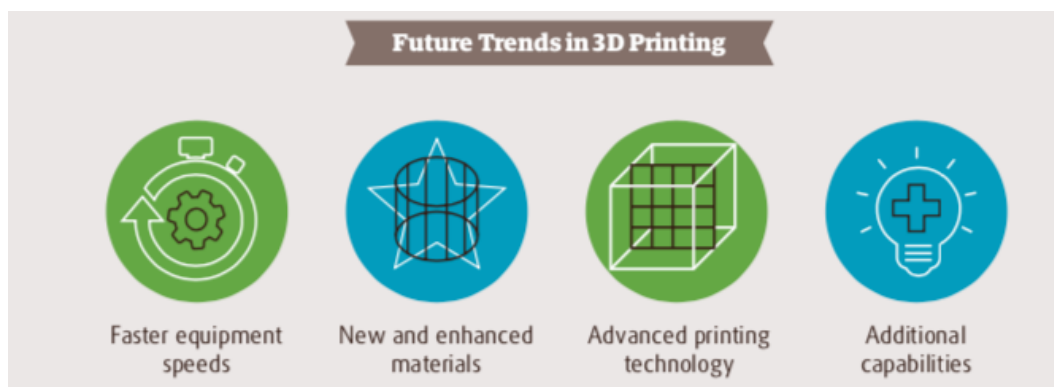


Figura 153: o futuro da impressão 3D. Fonte: USPS

Estudos ajudam a pavimentar os caminhos e nos guiam diante de tantas oportunidades, confirmando o crescimento da manufatura aditiva e tudo que a cerca. Segundo a MarketsandMarkets⁸³, o mercado global de impressão 3D deverá crescer de 9,9 bilhões de dólares em 2018 para 34,8 bilhões de dólares até 2024. A medida que a velocidade de venda das impressoras e as capacidades de volume aumentam, novos empregos são gerados, criando uma sinergia entre os setores envolvidos. O presidente da empresa Wholers Association, Terry Wohlers confirma em uma entrevista:

À medida que a indústria cresce, aumenta a necessidade de designers, cientistas e pesquisadores - especialmente químicos - desenvolverem novos materiais[...]Além disso, precisaremos de engenheiros mecânicos e elétricos para desenvolver impressoras 3D de nova geração, engenheiros de produção para desenvolver processos e cadeias de suprimento e educadores para apresentar tudo isso a uma nova geração de projetistas, técnicos e outros. (WOHLERS, 2014)

A revolução da impressão 3D não está simplesmente em tornar as impressoras mais rápidas e precisas, uma vez que as máquinas não pensam e não possuem a inteligência e o senso crítico do ser humano. A união entre o homem e a máquina é essencial. Pesquisadores são essenciais para o desenvolvimento de novos materiais e de tecnologias que as utilizarão. Ainda não é possível imprimir metal e plástico juntos por exemplo, porque o calor necessário para fundir o metal vaporizaria o plástico.

⁸³ Disponível em: < <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/3d-printing.asp> > Acesso em 25/03/2019

Esses novos materiais, bem como melhorias em materiais existentes, não apenas permitirão novas aplicações, mas também ajudarão a reduzir seu preço. O metal ganhará destaque e crescerá mais rapidamente que os plásticos. De acordo com o novo relatório da Wohlers Report⁸⁴ lançado em 2018 (Figura 154), cerca de 1.768 sistemas de MA em metal foram vendidos em 2017, em comparação com 983 sistemas em 2016. Este aumento de quase 80% acompanha a tendência do mercado, garante que melhorias aplicadas ao processo estão sendo desenvolvidas pelas empresas fabricantes e adotadas pelos usuários, que cada vez mais estão se conscientizam dos benefícios das peças de metal produzidas por meio da manufatura aditiva.

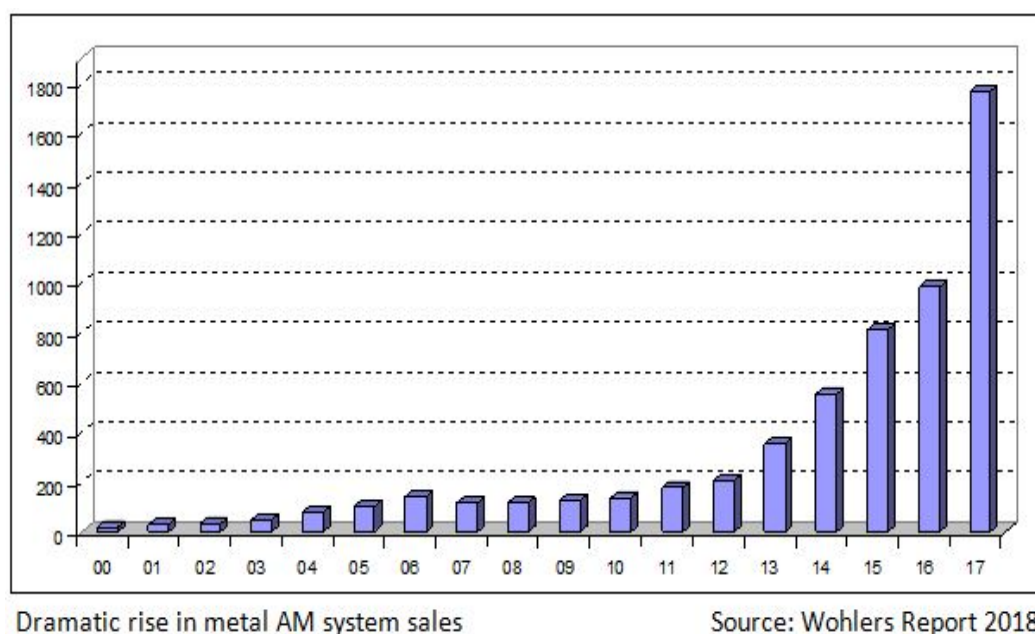


Figura 154: tabela com o aumento das vendas de MA em metal. Fonte: Wohlers Report 2018

Quando se pensa em novos materiais, temos em mente o pó, o líquido e o filamento. Porém, no futuro próximo esse conceito irá evoluir. Tim Brown presidente da IDEO, empresa de design, afirma:

Hoje, os designers são treinados para operar no mundo físico construindo coisas a partir de materiais. No futuro, os designers terão que ampliar suas ideias. Essa é uma mudança interessante e que exigirá que as ferramentas mudem, e que também exigirá que os modelos conceituais dos designers mudem. (BROWN, 2015)

⁸⁴ Disponível em: <https:// Wohlersassociates.com/press74.html>. Acesso em Fev. 2018

Pesquisas em torno de materiais inteligentes e biológicos estão sendo realizadas e pesquisadores já trabalham para a impressão 3D se tornar 4D (Figura 155). Na impressão 4D as estruturas são impressas com materiais inteligentes que podem mudar de formas quando estimuladas pelo ambiente (como mudanças de temperatura, pressão e campo eletromagnético). Por exemplo, estruturas bidimensionais pode se transformar em tridimensionais dependendo do meio em que estão inseridas ou são estimuladas. (LU; LI; TIAN, 2015)



Figura 155: demonstração da impressão 4D. Fonte: MIT

Temos também a *Bioprinting*, na qual materiais biológicos são utilizados para fabricar órgãos e tecidos humanos (Figura 156). Essencialmente funciona de maneira semelhante à impressão 3D convencional. Um modelo digital se torna um objeto físico camada por camada. Neste caso, no entanto, são utilizados células vivas em vez de plástico ou resina. A impressão celular assim como a impressão 4D envolvem transformações no processo e vão revolucionar áreas desde vestuário, arquitetura, design de produto e fabricação, até as indústrias aeroespacial e automotiva. Para permitir avanços, a união das tecnologias é necessária para a revolução: impressão 3D e 4D, materiais e novos softwares.



Figura 156: uma orelha que foi impressa utilizando células vivas. Fonte: Cellink

Na área tecnológica um avanço depende e afeta outras. Como afirma Christopher Tuck vice-diretor do Conselho de Pesquisa de Engenharia e Ciências Físicas do Reino Unido: “[...]Se você desenvolver continuamente os materiais, então os processos terão que mudar, e os sistemas de projeto terão que evoluir, então é um alvo de pesquisa em movimento” (TUCK, 2014)

Não temos como afirmar o que será da MA, mas baseado em outras histórias, como a viagem espacial que é para muito poucos, ou os televisores que começaram com um valor muito elevado e sofreram e sofrem uma queda constante no preço e hoje estão presentes em todas as classes sociais, podemos nos questionar: Qual a história a ser contada da MA daqui pra frente?

Referências bibliográficas

- FERGUSON, Eugene. **Engineering and the Mind's Eye**. Cambridge: The Mit Press, 1994. 264 p. (MIT Press).
- ANDERSON, Chris. **Makers: The New Industrial Revolution**. Davers: Crown Business, 2012.
- LOPES, Jorge et al. **Tecnologias 3D. Desvendando o Passado, Modelando o Futuro**. Rio de Janeiro: Lexikon, 2013.
- HOSKINS, Stephen. **3D Printing for artists, designers and makers**. Nova lorque: Bloomsburry, 2013.
- HOPKINSON, N.; HAGUE, R.j.m.; DICKENS, P.m.. **Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age**. Loughborough University, Uk: John Wiley & Sons, 2006. 285 p.
- WARNIER, Claire et al (Ed.). **Printing Things: Visions and Essentials for 3D Printing**. Berlin: Gestalten, 2014. 256 p.
- GERSHENFELD, Neil. **FAB: The coming revolution on your desktop - from personal computers to personal fabrication**. New York: Basic Books, 1999. 278 p.
- VOLPATO, Neri et al (Org.). **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. 400 p
- TOM WUJEC (Ed.). **Imagine Design Create: How designers, architects, and engineers are changing our world**. New York: Melcher Media, 2011.
- REDWOOD, Ben; SCHOFFER, Filemon; GARRET, Brian. **The 3D printing handbook: technologies, design and application**. Amsterdam: Coers & Roest, 2017
- GERSHENFELD, Neil; GERSHENFELD, Alan; GERSHENFELD, Joel Cutcher. **Design reality: How to survive and thrive in the third digital revolution**. Nova lorque: Basic Books, 2017.
- CHEN, Dejun.; XIE, Shane.; ZHOU, Zude. **Fundamentals of digital manufacturing science**. Nova lorque: Springer, 2012, p. 248.
- LABACO, Ronald T.. **Out of hand: Materializing the post digital**. Londres: Black Dog Publishing, 2013.
- MACGREGOR, Neil. **A história do mundo em 100 objetos**. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2013.
- ANDERSON, Chris. **Makers: The New Industrial Revolution**. Berkley: Crown Business, 2012.
- BAXTER, Mike. **Projeto de Produto: Guia Prático Para o Design de Novos Produtos**. São Paulo: Blucher, 2011.

- VINCK, Dominique (org.). **Engenheiros no Cotidiano** - Etnografia da atividade de projeto e de inovação. Tradução de Marlene Machado Zica Vianna, Belo Horizonte: Fabrefatum, 2013.
- CAMPBELL, Thomas et al (Org.). **Could 3D Printing Change the World?:** Technologies, Potencial and Implications of Additive Manufacturing. Washington: Atlantic Council, 2011.
- LOPES, Jorge et al (Ed.). **Tecnologias 3D:** desvendando o passado, modelando o futuro. Rio de Janeiro: Lexikon, 2013.
- ANDERSON, Chris. **A Cauda Longa:** Do mercado de massa para o mercado de nicho. São Paulo: Editora Campus, 2006.
- CARPO, Mario. **The Alphabet and the Algorithm.** Cambridge: The MIT Press, 2011.
- SISTEMA FIRJAN. **Indústria 4.0.** 2016. Disponível em: <<https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-inovacao/industria-4-0-1.htm#pubAlign>>. Acesso em: 24 abr. 2018.
- MEGGIOLARO, Marco Antonio. **Riobotz Combat Robot Tutorial.** Rio de Janeiro: Lexington, 2009.
- COMMUNICATION PROMOTERS GROUP OF THE INDUSTRY-SCIENCE. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0:** Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Alemanha: Acatech – National Academy Of Science And Engineering, 2013.
- DEWAR, James A.. **The Information Age and the Printing Press:** Looking Backward to See Ahead. 1998. Disponível em: <<https://www.rand.org/pubs/papers/P8014/index2.html#fnb1>>. Acesso em: 29 nov. 2017.
- FORMLABS (Estados Unidos). **3D Scanning for Reverse Engineering, Restoration, and Metrology.** 2018. Disponível em: <www.formlabs.com.br>. Acesso em: 23 ago. 2018.
- AKELLA, Ravi. **What Generative Design Is and Why It's the Future of Manufacturing.** 2018. Disponível em: <<https://www.industryweek.com/technology-and-iiot/what-generative-design-and-why-its-future-manufacturing>>. Acesso em: 16 mar. 2018.
- MCCUE, Tj. **3D Printing Is Changing the Way We Think.** 2015. Disponível em: <<https://hbr.org/2015/07/3d-printing-is-changing-the-way-we-think>>. Acesso em: 16 set. 2018.
- ZHOU, Marrian. **3D printed gun controversy: Everything you need to know:** Here's a breakdown of the debate that pits free speech and gun rights against public safety. 2018. Disponível em: <<https://www.cnet.com/news/the-3d-printed-gun-controversy-everything-you-need-to-know/>>. Acesso em: 16 out. 2018.

- SELF-ASSEMBLY LAB (Eua). Mit (Org.). **Rapid Liquid Printing**. 2017. Disponível em: <<https://selfassemblylab.mit.edu/rapid-liquid-printing/>>. Acesso em: 17 set. 2018.
- GOLDBERG, Dana. **History of 3D Printing: It's Older Than You Are (That Is, If You're Under 30)**. 2018. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/redshift/history-of-3d-printing/>>. Acesso em: 23 set. 2018.
- BULL, Glen et al. Educational Implications of the Digital Fabrication Revolution. **Journal Of Research On Technology In Education**, [s.l.], v. 42, n. 4, p.331-338, jun. 2010. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15391523.2010.10782554>.
- DESKTOP METAL (Estados Unidos). **3D printing the next generation of golf clubs**. 2019. Disponível em: <<https://www.desktopmetal.com/resources/>>. Acesso em: 19 mar. 2019.
- DESKTOP METAL (Estados Unidos). **BattleBots® team builds combat robot with Studio System parts**. 2018. Disponível em: <<https://www.desktopmetal.com/case-study/battlebots/>>. Acesso em: 19 mar. 2019.
- DAVIES, Jack. **3D Modeling CAD Software**. Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-modeling-cad-software#author>>. Acesso em: 20 mar. 2019.
- WIRED. **Democratizing Design: Autodesk's CEO Carl Bass Announces 123D**. Disponível em: <<http://www.wired.com/business/2011/05/democratizing-design/>>. Acesso em: 27 de Dezembro de 2013.
- ALL3DP. **4 Most Common 3D Printer File Formats in 2019**. 2019. Disponível em: <<https://all3dp.com/3d-printing-file-formats/>>. Acesso em: 20 mar. 2019.
- ALL3DP. **3D Printed Fashion: The State of the Art in 2019**. 2019. Disponível em: <<https://all3dp.com/2/3d-printed-fashion-the-state-of-the-art-in-2019/>>. Acesso em: 21 mar. 2019.
- EISENHARDT, Kathleen M.. Building Theories from Case Study Research. **The Academy Of Management Review**, [s.l.], v. 14, n. 4, p.532-550, out. 1989. Academy of Management. <http://dx.doi.org/10.2307/258557>.
- SAVAGE, Neil. Technology: Building opportunities. **Nature**, [s.l.], v. 509, n. 7501, p.521-523, 21 maio 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1038/nj7501-521a>. Disponível em: <<https://www.nature.com/nature/journal/v509/n7501/full/nj7501-521a.html>>. Acesso em: 24 set. 2018.
- LU, Bingheng; LI, Dichen; TIAN, Xiaoyong. Development Trends in Additive Manufacturing and 3D Printing. **Engineering**, [s.l.], v. 1, n. 1, p.085-

089, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.15302/j-eng-2015012>.

CREASE, Alex. **Using Markforged 3D Printers for BattleBots**. 2019. Disponível em: <<https://markforged.com/blog/markforged-3d-printers-battlebots/>>. Acesso em: 01 nov. 2019.

CLINGMAN, Ryan. Maximizing Strength for Printing Combat Robots with a 3D Printer. **Servo Magazine**, North Hollywood, v. 17, n. 1, p.26-28, jan. 2019.

Apêndice

Respostas do questionário da pesquisa (página 85)

Carimbo de data/hora	Já utilizou impressão 3D em combate?	Qual a categoria?	Qual impressora usou e tecnologia da mesma?	Onde a impressora fica?
11/11/2019 22:31:50	Sim	Beetleweight		Universidade
11/11/2019 22:32:20	Sim	Beetleweight		Universidade
11/11/2019 22:32:50	Sim	Beetleweight	Graber i3	Universidade
11/11/2019 22:33:07	Sim	Antweight, Beetleweight	Makerbot	Casa
11/11/2019 22:33:33	Sim	Antweight, Beetleweight, Featherweight	Impressora feita pela equipe (XY Axis)	Universidade
11/11/2019 22:34:43	Sim	Fairyweight, Antweight, Beetleweight	Sprint 3D, fdm	Empresa que trabalho.
11/11/2019 22:35:52	Sim	Antweight, Beetleweight	Stella, fdm	Casa
11/11/2019 22:36:27	Sim	Beetleweight, Featherweight	Strasys, Ultimaker, Zmorph, Snapmaker	Universidade
11/11/2019 22:37:07	Sim	Fairyweight, Antweight, Beetleweight		Universidade
11/11/2019 22:39:02	Sim	Fairyweight, Antweight	N sei, foi o patrocinador que fez	Patrocinador
11/11/2019 22:40:02	Sim	Fairyweight, Antweight, Beetleweight	sprint std tecnologia fdm	Patrocínio da empresa Sprint 3D
11/11/2019 22:41:50	Sim	Antweight	Impressora 3d caseira	Casa
11/11/2019 22:42:19	Sim	Fairyweight, Antweight, Featherweight	Desconheço	Universidade
11/11/2019 22:45:05	Sim	Antweight, Beetleweight, Hobbyweight		Universidade
11/11/2019 22:46:15	Sim	Fairyweight	Não lembro	Universidade
11/11/2019 22:51:04	Sim	Beetleweight	Tarantula	Universidade
11/11/2019 22:59:23	Sim	Fairyweight, Antweight, Beetleweight	sprint std tecnologia fdm	empresa Sprint 3d
11/11/2019 22:59:30	Sim	Beetleweight		Amigo
11/11/2019 23:08:28	Sim	Beetleweight	Stella 1 e Stella 2. Tecnologia baseada em Arduino	Trabalho
11/11/2019 23:09:47	Sim	Antweight	Ender 4 / petg fibra carbono	Casa
11/11/2019 23:10:42	Sim	Beetleweight		Casa
11/11/2019 23:19:57	Sim	Fairyweight, Antweight, Beetleweight	Utilizamos uma FDM, impressora de parceiros e terceiros	Universidade
11/11/2019 23:26:08	Sim	Antweight, Beetleweight	Stella 2.0	Casa
11/11/2019 23:27:03	Sim	Beetleweight	Ender 3	Casa
11/11/2019 23:32:08	Sim	Fairyweight, Antweight	Ender 3	Casa
12/11/2019 00:24:43	Sim	Antweight, Lightweight		Universidade
12/11/2019 00:33:44	Sim	Antweight, Lightweight		Universidade
12/11/2019 00:37:57	Sim	Antweight, Hobbyweight	Caseira FDM	Casa
12/11/2019 02:33:45	Sim	Antweight, Beetleweight	Grabber	FAB Lab
12/11/2019 05:37:49	Sim	Beetleweight	Usamos a Creality Ender 3	Universidade
12/11/2019 07:06:09	Sim	Antweight, Beetleweight, Hobbyweight	Wanhao i3 - FDM	Casa
12/11/2019 07:36:06	Sim	Antweight, Beetleweight, Hobbyweight	Sethi	Casa
12/11/2019 08:39:58	Não	Antweight, Beetleweight	Anet A8	Casa
12/11/2019 11:14:31	Sim	Beetleweight, Hobbyweight	Makerbot	Universidade
12/11/2019 11:16:47	Sim	Featherweight		Universidade
12/11/2019 11:18:49	Sim	Beetleweight		Universidade
12/11/2019 11:20:36	Sim	Beetleweight	Impressora feita pela própria equipe	Universidade

Qual o material usado para imprimir?	O que foi impresso?	Fez algum pós tratamento na peça?	Qual a vantagem de utilizar a impressão 3D no combate?
PETG	Suporte de motores		Facilidade de fabricação, Liberdade no design
PLA	Suporte de motores, Protótipos		Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design, Diversidade de materiais
ABS	Chassi	Fita adesiva	Rapidez, Facilidade de fabricação, Peso
PLA, ABS	Chassi	Nenhum	Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design
PLA, ABS, PETG	Chassi, Suporte de motores, Protótipos, Proteção para cabos		Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design
PLA, ABS	Chassi, Suporte de motores, Arma, Protótipos	Resina naval nas faces externas.	Rapidez, Facilidade de fabricação
PLA, Nylon, Petg	Chassi		Facilidade de fabricação, Liberdade no design, Preço
ABS	Chassi, Suporte de motores, Protótipos		Facilidade de fabricação, Liberdade no design
PLA, ABS, Nylon	Chassi, Suporte de motores, Protótipos		Rapidez, Liberdade no design
PLA, ABS, Nylon, Tpu	Chassi, Suporte de motores, Protótipos, Engrenagens de teste para "shellspinner"	Vapor com acetona, Verniz, Mistura de filamento prévio	Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design, Diversidade de materiais
PLA, ABS	Todo o robô, já imprimimos robôs completos com arma ativa impressa na categoria fary, 2 beetles com arma passiva, e varias carcaças de ants	resina de barco	Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design, Diversidade de materiais
PLA	Suporte de motores		Rapidez, Facilidade de fabricação
PLA, ABS	Chassi, Suporte de motores, Protótipos		Facilidade de fabricação, Liberdade no design
PLA, ABS	Suporte de motores, Protótipos, proteção contra sujeira		Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design
PLA	Chassi	Nenhum	Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design, Diversidade de materiais
PLA	Chassi, Suporte de motores, Protótipos		Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design
PLA, ABS	Chassi, Suporte de motores, Arma, Protótipos	Vapor com acetona	Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design
PLA	Polia		Facilidade de fabricação, Liberdade no design, Peso
PLA	Suporte de motores, Parede lateral (apenas para proteger da saída de fios e componentes internos)		Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design, Dificil acesso a outros materiais e empresas de usinagem na região nordeste do país
Petg	Chassi		Rapidez
PLA	Suporte de motores, Suporte para o mancal da arma		Facilidade de fabricação, Liberdade no design
PLA, ABS	Chassi, Suporte de motores, Protótipos	Recozimento	Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design, Diversidade de materiais
PLA	Chassi, Suporte de motores, Suporte das armas		Liberdade no design
PLA	Chassi, Suporte de motores		Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design
PLA, ABS	Chassi, Suporte de motores		Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design
PLA	Suporte de motores, Proteção de sujeira		Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design
PLA, ABS	Chassi, Suporte de motores, Protótipos, proteção de eletrônica		Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design, Diversidade de materiais
Pet-g	Chassi, Suporte de motores, Protótipos, Suportes em geral		Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design
ABS, Nylon	Suporte de motores, Protótipos		Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design
ABS	Chassi	Nenhum	Facilidade de fabricação, Liberdade no design
PLA, ABS	Suporte de motores, Protótipos		Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design
PLA, ABS	Chassi, Suporte de motores, Arma, Protótipos		Facilidade de fabricação, Liberdade no design, Diversidade de materiais
ABS, Nylon	Chassi, Suporte de motores	Vapor com acetona	Rapidez, Facilidade de fabricação
ABS	Suporte de motores, Protótipos	NÃO	Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design
PLA	Chave geral		Rapidez, Facilidade de fabricação, Liberdade no design
ABS	Chassi, Suporte de motores, Protótipos	Verniz	Facilidade de fabricação, Liberdade no design, Diversidade de materiais
PLA, ABS, Pet G	Suporte de motores, Protótipos		Liberdade no design, Diversidade de materiais

Qual a desvantagem de utilizar a impressão 3D no combate?	Depois da 1ª competição com peças impressas continua utilizando impressão 3D?	Acredita no crescimento da utilização da impressão 3D no combate através de quais meios?
Fragilidade, Pequena base de impressão	Sim	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão
Fragilidade, Alto custo	Sim	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão, Softwares de CAD
Fragilidade, Dificuldade de imprimir	Talvez	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão
Fragilidade	Sim	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão
Fragilidade, Fixação(dificuldade em fazer roscas)	Sim	Novos materiais, Design
Fragilidade	Sim	Design
Fragilidade, Dificuldade de imprimir	Sim	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão, Softwares de CAD, Design, Vitórias de robôs que utilizam impressão.
Fragilidade	Sim	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão, Design
Fragilidade	Sim	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão
Fragilidade, Dificuldade de imprimir	Sim	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão, Softwares de CAD, Design
Fragilidade	Sim	tecnicas de composição de materiais na hora da montagem . .
Fragilidade	Sim	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão
Fragilidade, Alto custo	Não	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão, Softwares de CAD, Design
Fragilidade	Sim	Novos materiais
Fragilidade, Dificuldade de imprimir	Sim	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão, Softwares de CAD, Design
Fragilidade	Sim	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão
Fragilidade	Sim	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão, Design
Fragilidade	Sim	Novas tecnologias de impressão, Design
Fragilidade, Dificuldade de imprimir	Sim	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão, Softwares de CAD, Design
Fragilidade	Não	Novos materiais
Fragilidade, Pequena base de impressão	Sim	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão, Design
Fragilidade, Dificuldade de imprimir	Sim	Novos materiais, Softwares de CAD, Design
Peso para aa categorias	Sim	Softwares de CAD, Design
Fragilidade, Pequena base de impressão	Sim	Novos materiais, Design
Fragilidade	Sim	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão
Fragilidade	Sim	Novos materiais
Fragilidade, Alto custo, Pequena base de impressão, Dificuldade de imprimir	Sim	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão, Softwares de CAD, Design
Fragilidade, Tem que ter um design muito bem feito para aproveitar as propriedades da impressão	Sim	Novos materiais, Design
Fragilidade	Não	Novos materiais
Dificuldade de imprimir	Sim, só que com utilizações diferentes	Novas tecnologias de impressão, Softwares de CAD, Design
Fragilidade, Alto custo	Não	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão
Fragilidade, Pequena base de impressão	Sim	Novos materiais
Fragilidade, Pequena base de impressão	Sim	Novos materiais
Fragilidade, Dificuldade de imprimir	Sim	Novos materiais, Design
Fragilidade, Dificuldade de imprimir	Sim	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão
Fragilidade, Alto custo, Pequena base de impressão	Apenas para peças de suporte que são protegidas.	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão, Softwares de CAD
Fragilidade	Sim	Novos materiais, Novas tecnologias de impressão