
O estado da arte para o desenvolvimento de um sistema de estereofotogrametria: 2D para 3D

Giovani Francelino
Douglas Martins
Eduardo Blando

Resumo: O referido artigo apresentará o estado da arte para uma pesquisa que será desenvolvida, tendo como enfoque o uso de tecnologias de modelagem e impressão 3D, visando a otimização do uso da tecnologia de estereofotogrametria, já aplicada a um bom tempo na rotina dos profissionais que necessitam fazer análises de imagens e/ou regiões para tomar decisões e auxiliar o desenvolvimento de projetos que necessitam deste tipo de análise de imagem para a execução relativa aos projetos citados. O objetivo é verificar a possibilidade da redução do tempo de modelagem, bem como facilitar o uso deste tipo de tecnologia, que é a estereofotogrametria para que o usuário comum possa dispor de tal recurso, de forma simplificada em um ambiente doméstico. Com esta abordagem de estudo pretendemos alinhar algumas das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 vinculadas também a um ambiente de aprendizagem 4.0.

Palavras-chave: Estereofotogrametria; Impressão 3D; Modelagem 3D.

1 INTRODUÇÃO

O processo de impressão 3D é atualmente uma realidade acessível, não limitada a indústria de ponta. Disponível a pelo menos mais de 40 anos, o processo só se popularizou recentemente, com o advento do avanço tecnológico que possibilitou a redução no custo total dos dispositivos de impressão, do material de deposição e na forma do processo de impressão. Patenteada ainda na década de 1980, diversas formas de impressão 3D surgiram, destacando-se entre elas a FDM (*fused deposition modeling*) ou FFF (*filament freeform fabrication*). Esta forma de impressão consiste na extrusão controlada e continuada de um material termoplástico que é depositado sobre uma mesa pré-aquecida, camada a camada. Em tese, qualquer objeto pode ser impresso, mesmo que possua peças

móveis, desde que seja modelado em uma forma computadorizada que é interpretada como rota de impressão pelo equipamento de FDM.

Contudo, a modelagem 3D de objetos nem sempre é uma tarefa trivial. Ela consiste no processo de desenvolvimento de uma representação matemática através de *software* especializado de qualquer superfície ou volume, podendo exibir movimentos ou não. Modelos 3D são usados em uma grande variedade de áreas atualmente, indo desde artes até engenharia, passando pela indústria do entretenimento e indo até a medicina, ente outras áreas. Construir um modelo 3D computadorizado que seja representativo de um objeto pode requerer de algumas horas de trabalho em *software* dedicado até centenas delas, dependendo do nível de detalhe que se deseja. Além disso, é necessário ter sólidos conhecimentos do *software* que permite a construção de modelos, de matemática e boa dose de criatividade. Não é a toa que profissionais da área são muitas vezes chamados de artistas 3D e a técnica de escultura 3D.

Ao longo dos anos, diversas soluções foram propostas para as dificuldades de modelagem 3D, destacando-se entre elas a estereofotogrametria. Seu objetivo é construir um objeto realístico em 3 dimensões baseando-se em uma série de imagens fotográficas do que se deseja modelar. A vantagem deste modo é usar um meio sem contato com o objeto para obter seu modelo 3D. Ainda que este processo exija geralmente um grande número de fotos, em geral ele exige menos talento e conhecimento de um *software* especializado de modelagem 3D, favorecendo sua aplicação.

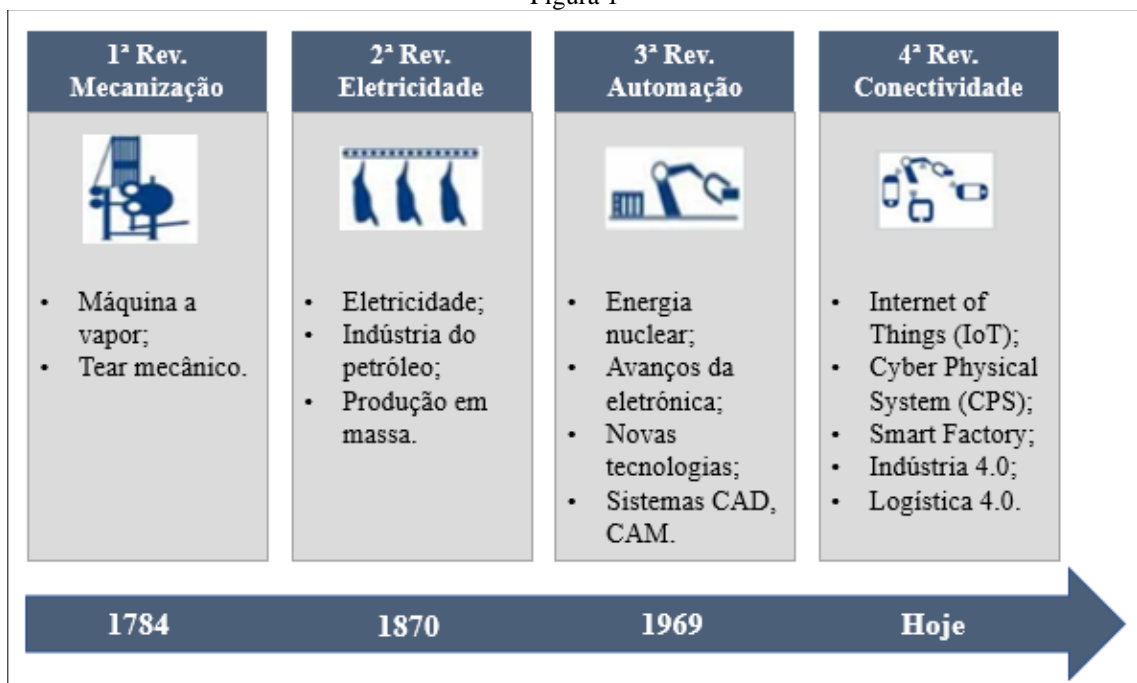
Deste modo, o objetivo deste artigo consiste em apresentar o estado da arte sobre as tecnologias relativas à estereofotogrametria em uma perspectiva baseada na prototipagem rápida com o uso de tecnologias relacionadas ao contexto da Indústria 4.0, tais como a impressão 3D. Este projeto também está diretamente conectado aos conceitos de cultura *maker*, e educação 4.0. O benefício gerado impacta diretamente alunos do curso de Engenharia de Produção e Matemática. Demais cursos poderão ser beneficiados no decorrer do projeto que se pretende desenvolver tendo como referência o artigo em questão.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INDÚSTRIA 4.0

O desenvolvimento industrial é caracterizado historicamente por revoluções que se concretizaram ao longo dos anos. Podemos afirmar que os primórdios destas revoluções datam em sua maior parte do século XVIII, mais especificamente entre os anos de 1784 – 1870, período este conhecido como a 1ª Revolução Industrial, caracterizado pelo desenvolvimento dos conhecimentos relativos à termodinâmica, cuja maior aplicação foi através do advento da máquina a vapor, desenvolvida por James Watt. No decorrer deste desenvolvimento entre os anos de 1870 – 1970 entramos em uma segunda onda, denominada de 2ª Revolução Industrial. Por sua vez este período foi caracterizado pelo advento da eletricidade, indústria química, indústria petroquímica e indústria siderúrgica. Na sequência passamos a viver a 3ª Revolução Industrial, entre 1970 – 2000 que se caracteriza pelo advento das tecnologias de eletrônica, automação, TI e biotecnologia. Contemporaneamente estamos vivenciando aquilo que passou a ser chamado de 4ª Revolução Industrial, que tem por característica o uso de tecnologias relativas a sistemas ciber físicos, IoT (Internet das Coisas), IA (Inteligência Artificial), Big Data, entre outras tecnologias habilitadoras. Segundo relatório do (BCG – Boston Consulting Group, 2016), existem nove principais tecnologias na Indústria 4.0, determinando a produtividade e crescimento das indústrias sobre esta nova configuração (FREITAS, 2017). A figura abaixo esclarece melhor este histórico de desenvolvimento.

Figura 1



Histórico das Revoluções Industriais – Fonte (SANTOS et al, 2018)

Diferente das revoluções industriais que ocorreram ao longo da história e que foram diagnosticadas anos após seu acontecimento, a quarta revolução industrial é a primeira em que seus conceitos, impactos e resultados são mensurados ao mesmo tempo em que ela ocorre, sendo prevista como tendência para um modelo de produção industrial (GOMES, 2016). Isto representa um desafio que deve ser enfrentado pelas organizações que pretendem se adaptar a esta nova configuração de desenvolvimento, sendo já realidade em muitos países desenvolvidos e que está começando a se consolidar em países em desenvolvimento.

O contexto chave passa a ser conectividade associada a automação, conforme citado por Macdougall et al (2014), visando uma maior produtividade dos sistemas, bem como uma maior competitividade em um ambiente de acirrada concorrência. A 4ª Revolução Industrial passa a ser conhecida nos meios acadêmicos e empresariais como Indústria 4.0.

A Indústria 4.0 não se trata de uma revolução, mas sim da evolução dos processos, com a consequente aplicação de tecnologias e metodologias desenvolvidas ao longo das últimas três décadas (DIHLMAN, 2019). Em análise feita por Dihlman (2019) este diz que não podemos deixar de pensar nas novas possibilidades de desenvolvimentos relativos a esta evolução, que é a indústria 4.0. Arrisca a dizer que em um curto espaço de tempo tende-se a surgir a indústria 5.0, baseada no surgimento das microfábricas (*home-factory*), sendo esta etapa caracterizada como a regressão da indústria gigante para a produção caseira. Dihlman também fala da possibilidade do surgimento da indústria 6.0, que poderá estar baseada nas tecnologias relacionadas aos comandos por ondas cerebrais. Sua abrangência será tão grande que diversos equipamentos, máquinas e sistemas serão controlados diretamente por métodos sensoriais. Quase um “produzir o pensamento”.

Em estudo realizado pela empresa de consultoria McKinsey foi constatado que a possibilidade de trabalhadores humanos serem totalmente substituídos por robôs afeta menos de 5% das profissões, porém se for levado em consideração a quantidade de atividades executadas por estes profissionais em suas rotinas de trabalho a possibilidade de substituição destas atividades chega a 50% com base nas tecnologias existentes atualmente. Não adianta adotar novas ferramentas, integrar tecnologia da informação e tecnologia operacional, sem modificar a forma como as pessoas trabalham (CRUZ, 2019).

A emergência da digitalização denuncia que os trabalhadores destas áreas que serão impactadas por essa revolução precisarão desenvolver competências que atendam aos requisitos exigidos pelos diversos setores produtivos para acompanharem os avanços desta nova revolução

industrial. As competências dos trabalhadores da Indústria 4.0 mais requeridas são: criatividade, inovação, comunicação, solução de problemas e conhecimentos técnicos. (AIRES et al., 2017).

É fundamental dentro deste contexto estar atualizado e desenvolver pesquisas que visam a melhoria, otimização e racionalização dos recursos envolvidos neste ambiente, bem como contribuir para o desenvolvimento e disseminação do conhecimento, além de gerar oportunidades para a possibilidade do desenvolvimento de novas pesquisas que contribuam para o desenvolvimento do país.

2.2 FOTOGRAMETRIA E ESTEREOFOTOGRAMETRIA

Para o desenvolvimento da presente pesquisa o uso e conhecimento da tecnologia de estereofotogrametria é fundamental para que os objetivos sejam atingidos. A estereofotogrametria é uma tecnologia que descende da fotogrametria. Etimologicamente a palavra fotogrametria deriva do grego, *foto* (luz), + *gramma* (traçado) + *metron* (medida), o que significaria literalmente medir por meio do traçado da luz. Como esse traçado luminoso pode ser registrado em um filme fotográfico, poderíamos agora obter um novo significado: medir através de fotografias (ROSALEN, 1997).

A fotogrametria, ASP (1966), é a arte, ciência e tecnologia de obter informações de confiança sobre objetos e do meio ambiente com o uso de processos de registros, medições e interpretações das imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética registrados (TEMBA, 2000). Um dos recursos mais utilizados para o uso da fotogrametria são as câmeras de fotografia aérea instaladas em aviões para que seja feito o mapeamento de regiões terrestres a fim de se poder analisar as condições de determinada região para se fazer o seu adequado mapeamento, com base na análise interpretativa e métrica das imagens coletadas pelos equipamentos em questão.

O termo Fotogrametria apareceu no ano de 1855, criado pelo geógrafo Kersten e foi introduzido por Albrecht Meydenbauer (1834-1921) na literatura internacional em 1893, ao fotografar edificações de grande valor arquitetônico na Alemanha (CARNEIRO DA SILVA, 2015). Aimé Laussedat (1819-1907) já empregava o princípio da câmera clara em 1848 para desenhar vistas geometricamente exatas de áreas levantadas, e também desenvolveu o método de interseções para o desenho de plantas a partir de fotografias (Espartel, 1978). Por este motivo ele é considerado o “Pai da Fotogrametria” (CARNEIRO DA SILVA, 2015). O desenvolvimento desta técnica despertou

grande interesse por parte dos pesquisadores, engenheiros, topógrafos, geólogos, geógrafos e demais profissionais que viram uma enorme possibilidade de aplicação para a realização dos seus trabalhos, principalmente em tarefas relacionadas a mapeamentos de regiões.

A evolução da fotogrametria no seu início é detalhada por Dolezal (1909,1911, 1913, 1919) e Jordan (1944); nas fases seguintes por Slama (1980), McGlone (2004), Gruen (2008) e Burtch (2008). A nível nacional uma discussão histórica da fotogrametria é apresentada por Rocha et al (2010) cujo trabalho foi usado como principal referência (CARNEIRO DA SILVA, 2015). Com o advento tecnológico as técnicas e equipamentos utilizados foram sendo adequados para conferir um melhor e mais otimizado uso da fotogrametria. Quanto às suas classificações a fotogrametria pode ser classificada quanto à posição da câmera fotográfica e quanto à tecnologia empregada. Quanto à posição a mesma se divide em terrestre e aérea. Roselen (1997) também define que existe a fotogrametria espacial, quando a mesma é realizada utilizando recursos como satélites e/ou ônibus espaciais. Quanto à tecnologia está classificada em analógica, analítica e digital. Burtch (2008) classifica a fotogrametria em quatro tipos, que são: Prancheta 1850 – 1900, com medições sobre pranchetas e uso de fotografias simples; Analógica 1900 – 1960, com uso pleno de estereoscopia e desenvolvimento da aérea; Analítica 1960 - 1990 e digital a partir de 1990. A fotogrametria analítica se consolida devido a introdução dos computadores em maior escala e nos anos 1990 as fotografias começaram a ser digitalizadas onde começa a surgir as primeiras aplicações da fotogrametria digital. Em Espartel (1978) a fotogrametria por prancheta é chamada de fotogrametria comum e a analógica de estereofotogrametria. É importante notar que a fotogrametria analítica e a digital podem trabalhar com ou sem estereoscopia (CARNEIRO DA SILVA, 2015).

A estereoscopia é a propriedade que estuda os métodos e técnicas que permitem a visão em perspectiva, quer dizer, a percepção de objetos com todas as modificações aparentes, ou com os diversos aspectos que a sua posição ou situação determinam com relação à figura e a luz (TEMBA, 2000). A estereoscopia é uma terminologia da oftalmologia relacionada a fisiologia da visão. A junção dos conhecimentos relativos à estereoscopia com a fotogrametria fez com que surgisse através do advento tecnológico aquilo que se denomina estereofotogrametria, que é um dos objetos do presente projeto de pesquisa.

A fotogrametria digital, HEIPKE (1995), é uma tecnologia de informação usada para gerar informações geométricas, radiométricas e de semântica sobre objetos no universo 3D (tridimensional) obtidas de imagens digitais 2D (planas) destes objetos (TEMBA, 2000). HELAVA (1992) afirma

que, o domínio da tecnologia do computador, as imagens rasterizadas / vetorizadas (obtidas a partir de *scanners*) e a fotogrametria analítica compreendem as três vertentes de sustentação da fotogrametria digital (TEMBA, 2000).

Até aproximadamente o início da década de 1980, o processo de captação de imagens na fotogrametria constituía-se somente na tomada da fotografia via câmeras métricas específicas e o seu respectivo processamento (revelação da emulsão fotográfica). A partir da década de 1990, com o advento da fotogrametria digital, esse processo de captação de imagem passou a ter mais uma etapa, a numerização dessa imagem (geralmente um diapositivo) e o seu respectivo processamento, que constitui na aplicação de técnicas específicas de tratamento de imagens a fim de preparar a mesma para o processo de restituição fotogramétrica (ROSELEN, 1997). A tendência para o futuro da fotogrametria seria a substituição completa dos equipamentos restituidores analógicos e semi-analíticos e uma concorrência entre os equipamentos analíticos e digitais (ROSELEN, 1997). Acredita-se ainda que com o advento de uma câmera digital que substitua eficientemente uma câmera analógica, a fotogrametria digital substitua a fotogrametria analítica (ROSELEN, 1997). A figura abaixo ilustra a evolução das metodologias de captação de imagens através da evolução da tecnologia de fotogrametria.

Figura 2

Etapa	Fotogrametria Analógica	Fotogrametria Semi-analítica	Fotogrametria Analítica	Fotogrametria Digital	Fotogrametria Digital (futuro)
Cronologia	Imperou até a década de 70	Surgiu a partir da década de 60/70, sendo utilizada até hoje	Surgiu a partir da década de 70, sendo utilizada até hoje	Surgiu a partir da década de 90	?
Captação da Imagem	Câmeras Fotográfica	Câmeras Fotográfica	Câmeras Fotográfica	Câmeras Fotográfica e "Scanners"	Câmera Digital
Imagem utilizada na restituição	Fotográfica em diapositivos, negativos e papel	Fotográfica em diapositivos, negativos e papel	Fotográfica em diapositivos, negativos e papel	Digital (arquivos numéricos)	Digital (arquivos numéricos)
Orientação	Analógica	Analógica (Orientação absoluta em alguns casos é realizada analiticamente)	Analítica	Analítica	Analítica
Geração do mapa	Analógica	Analógica	Analógica	Analógica	Digital (correlação de imagens)
Geração de Curvas de nível	Analógica	Analógica	Analógica	Digital (MDT)	Digital (MDT)
Edição do Mapa	Graficamente	Digital (CAD)	Digital (CAD)	Digital (CAD)	Digital (CAD)
Observações	-	-	-	Sistema multi-tarefas (aerotriangulação, ortofoto, etc.)	Sistema multi-tarefas (aerotriangulação, ortofoto, etc.)

Quadro resumo de metodologias de captação, orientação e restituição fotogramétricas – Fonte: Roselen (1997)

Dando sequência ao contexto deste desenvolvimento tecnológico abordamos a tecnologia de estereofotogrametria. A etimologia da palavra estereofotogrametria vem do grego *estereo* (volume), *foto* (luz), + *gramma* (traçado) + *metron* (medida). Deste modo pode-se afirmar que a estereofotogrametria consiste na técnica de medição de corpos através do traçado da luz. Isto pode ser aplicado com o uso das tecnologias associadas à fotogrametria e a sua evolução. A estereofotogrametria também pode ser compreendida como a técnica de mapeamento de um corpo sólido, através do uso de uma série de fotografias realizadas em pontos determinados de todo o volume do objeto em questão. Seu objetivo é construir um objeto realístico em 3 dimensões baseando-se em uma série de imagens fotográficas do que se deseja modelar. A vantagem deste modo é usar um meio sem contato com objeto para obter seu modelo 3D, minimizando a carga de modelagem via software.

A análise dos modelos tridimensionais da estereofotogrametria pode ser feita por meio de mensurações linear, volumétrica, angular ou de área e/ou comparação de padrões de pontos de referência ou de faces inteiras (LADEIRA et al, 2012). Com a advento da tecnologia de fotogrametria

que serviu de base para a estereofotogrametria isto possibilitou que possamos contemporaneamente utilizar a tecnologia de estereofotogrametria associada com a tecnologia de impressão 3D.

2.3 IMPRESSÃO 3D

A evolução dos processos de fabricação evolui de forma contínua a fim de atender as demandas impostas pelos clientes e consumidores em um ambiente cada vez mais competitivo. Danilevicz (2006) apresenta na figura abaixo a evolução das eras industriais, tendo como ponto de partida a década de 1920, que caracteriza o momento de forte ascensão da era da produção em massa.

Figura 3

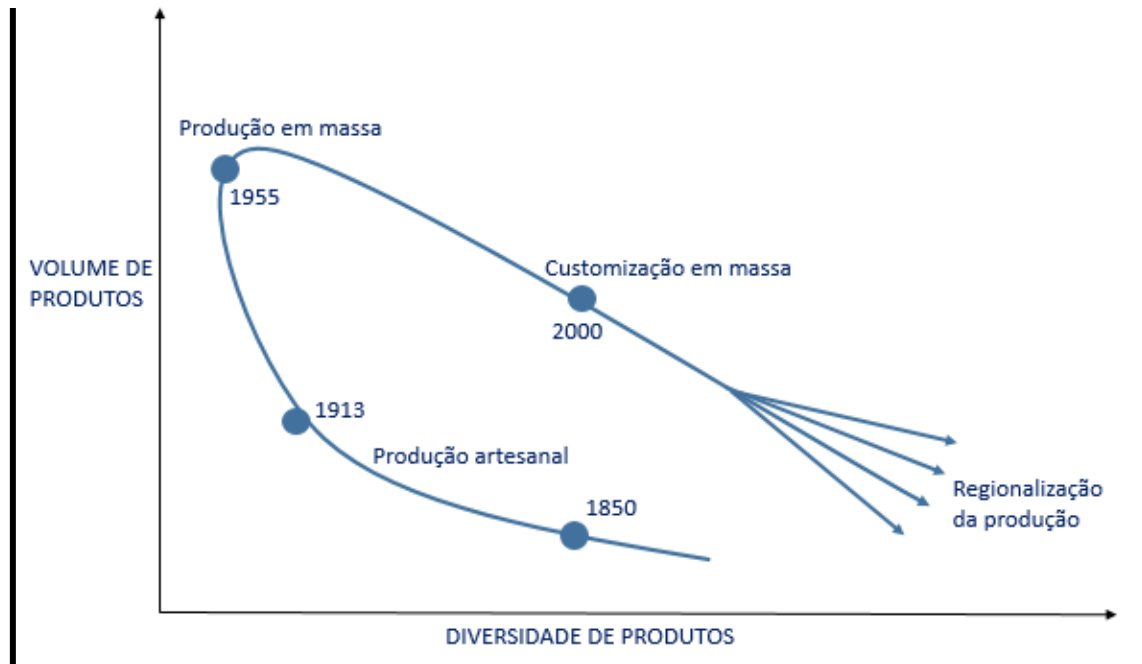
Desenvolvimento Industrial		
1920	Era da Produção em Massa	Estratégia "product out"; Demanda maior que a oferta; Empresa Funcional Taylorista
1950		
1950	Era da Produtividade	Estratégia "product in"; Produto orientado para o mercado (empurrado); Início das atividades de marketing;
1970		
1970	Era da Qualidade	Estratégia de Marketing de Valor (melhoria contínua da qualidade); Início da utilização, no ocidente do QFD;
1990		
1990	Era da Competitividade	Estratégia de "market in" - foco no cliente; Demanda menor que oferta; Produto com maior valor agregado; Para sobreviver - padrão de classe mundial;
...		

Eras do Desenvolvimento Industrial Fonte: Danilevicz (2006)

Como apresentado pela figura 3 estamos contemporaneamente na era da competitividade e para atender a este contexto os processos produtivos e de fabricação devem se adaptar a esta situação.

Uma das tendências para os próximos anos em termos de processos de fabricação, que possui grande probabilidade de competir com os processos tradicionais da indústria, como fundição e forjamento, que são processos de conformação mecânica é a impressão 3D. De acordo com a evolução das eras industriais percebe-se uma variação na flexibilidade da produção, onde isto é mostrado no gráfico abaixo. É interessante notar que o nível de diversidade de produtos disponíveis no mercado a partir do surgimento da 4ª revolução industrial é muito próximo ao nível historicamente registrado para os primórdios da 1ª revolução industrial. Porém o nível de volume de produtos, registrado para o período equivalente a 4ª revolução industrial é maior. Isto de certo modo comprova uma das características da Indústria 4.0 que é o incremento da customização em massa, conceito este em que as tecnologias de impressão 3D podem ser utilizadas de forma ampla.

Figura 4



Flexibilidade na produção – Fonte: CNI (2016)

A manufatura aditiva (AM – *Additive Manufacturing*) foi concebida pela primeira vez em 1986, devido ao patenteamento do processo de estereolitografia por Charles Hull (COELHO et al, 2018). Em 1988, Scott Crump, inventou uma nova forma de impressão de objetos tridimensionais, a Modelagem por Deposição de Material Fundido (*Fused Deposition Modeling* - FDM) (REZENDE, 2018).

A Impressão 3D pode ser definida como um processo utilizado para fabricar objetos tridimensionais baseado em uma deposição, controlada digitalmente, de sucessivas camadas de material até a criação de uma estrutura final. Também conhecida como Manufatura Aditiva, a tecnologia se opõe aos princípios da manufatura subtrativa, em que componentes são construídos através da remoção de material por processos como furação, fresamento, corte por serragem, entre outros (SANTANA et al, 2018).

A utilização dessa tecnologia também muda uma antiga tendência de produção. As vantagens elevadas de se produzir em países com mão de obra barata diminuem o que favorece a localização da produção, tornando mais rentável produzir bens em instalações mais perto de casa (COTTELEER, 2014). Isto, de certo modo, é ruim para os países em desenvolvimento que não se adequem as tendências da Indústria 4.0. Atualmente uma das estratégias das matrizes de empresas multinacionais é a fabricação de alguns de seus produtos em operações localizadas nos referidos países, pois o baixo custo da mão de obra possui um peso grande para este tipo de tomada de decisão. Porém não devem

ser levados em consideração para este tipo de tomada de decisão apenas os fatores relacionados aos custos de mão de obra. É importante a aplicação das ferramentas utilizadas para a localização industrial, como por exemplo, o método do centro de gravidade, o método da ponderação de fatores e o método do ponto de equilíbrio. Também é importante entender o peso de cada fator que o tomador de decisão aplica para estes.

Entretanto, a Impressão 3D ainda enfrenta alguns desafios técnicos como; o número limitado de materiais, imprecisão, custo elevado para produção em massa e as limitações no tamanho dos componentes que podem ser impressos (DELOITTE, 2015a), que podem a colocar em desvantagem quando comparada a fabricação tradicional.

Entre as principais vantagens da Impressão 3D em comparação aos processos de fabricação tradicionais estão: (i) eficiência: produção rápida e econômica, com baixas quantidades de material residual; (ii) criatividade: ideal para confecção de geometrias complexas; (iii) acessibilidade: preço razoável de máquinas e materiais (SANTANA et al, 2018). Quanto ao aspecto eficiência, em relação ao fator rapidez o mesmo tem que ser pesquisado e estudado de forma mais ampla, pois é sabido que a velocidade de fabricação relativa aos processos tradicionais ainda é maior que os processos de Impressão 3D.

Dos processos de manufatura aditiva utilizados têm-se o FDM (Modelagem por Fusão e Deposição) ou FFF (*filament freeform fabrication*), onde a matéria-prima utilizada na maioria dos casos é um filamento polimérico; SLA (Estereolitografia), em que a matéria-prima utilizada é uma resina líquida que passa por um processo de fotopolimerização através de uma reação de cura, dentre as técnicas de SLA existem duas utilizadas atualmente, que são a SSL (Estereolitografia por Escanemamento) e a PSL (Estereolitografia por Projeção). O tipo de processo a ser utilizado vai depender do tipo de aplicação a que se deseja. Para aplicações que exigem uma maior precisão dimensional o processo SLA é mais recomendado, porém consequentemente mais custoso. Já para aplicações de menor exigência o processo FDM se torna adequado. A figura abaixo apresenta diversos tipos de processos utilizados para a impressão 3D.

Figura 5

Tabela 2.1 – Principais tipos de processos de impressão 3D.

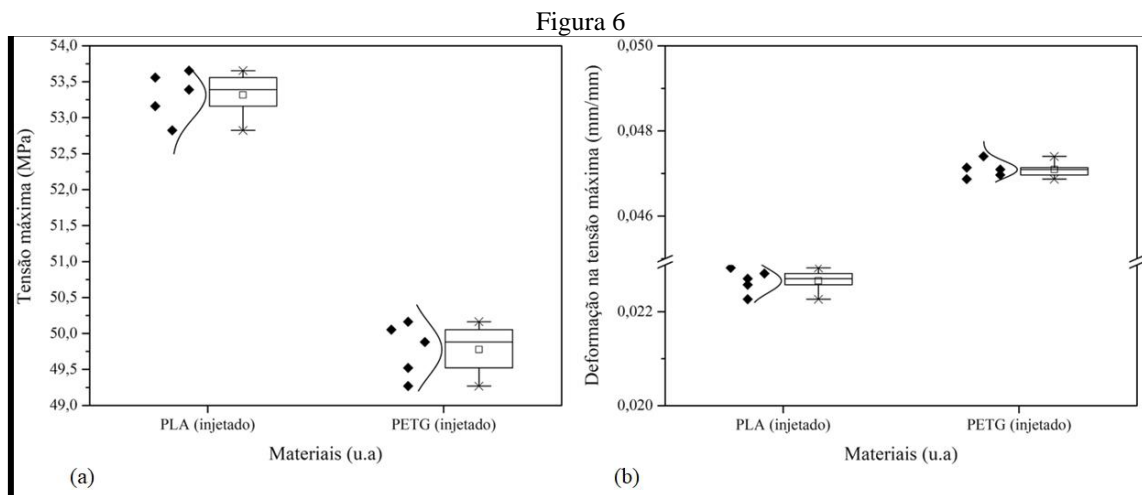
Tipo de Manufatura	Descrição
<i>Binder Jetting</i>	Um agente de ligação líquido é depositado seletivamente e imediatamente curado para unir partículas de pó.
<i>Directed Energy Deposition</i>	Um laser ou feixe de elétrons é usado para fundir o material depositado por um bocal sobre um leito de impressão.
<i>Material Extrusion (ME)</i>	O material é parcialmente fundido e dispensado seletivamente e sob fluxo contínuo através de um bocal ou orifício, como exemplo tem-se a FDM (<i>Fused Deposition Modeling</i>).
<i>Material Jetting</i>	Gotas de fotopolímero líquido ativadas pela luz, são seletivamente depositadas e solidificadas por luz ultravioleta instantaneamente, como exemplo tem-se a PolyJet.
<i>Powder Bed Fusion</i>	Um laser ou feixe de elétrons funde seletivamente regiões de um leito em pó, como exemplo tem-se a SLS (<i>Selective Laser Sintering</i>) e a DMLS (<i>Direct Metal Laser Sintering</i>).
<i>Sheet Lamination</i>	Folhas de materiais são recortados e unidas através de soldagem ultrassônica para formar um objeto.
<i>Vat Photopolymerization</i>	Utiliza uma cuba de resina de fotopolímero líquido solidificada por uma luz ultravioleta, como exemplo a SLA (<i>Stereolithography</i>).

Fonte: Adaptado de ASTM F2792-12a (2012).|

Principais tipos de processos de impressão 3D – Fonte: REZENDE (2018)

Quanto aos materiais mais utilizados em manufatura aditiva têm-se ABS, PLA, PETG, PC e PA. Algumas técnicas de impressão 3D já são capazes de utilizar uma vasta gama de materiais, incluindo alumínio, níquel, aço, titânio, polímeros diversos e cerâmicos (REZENDE, 2018). Porém deve ser levada em consideração uma análise de viabilidade consistente, bem como um adequado estudo quanto a aplicação destas peças com base nos materiais utilizados no processo de impressão 3D, devido a grande diversidade de tipos de materiais utilizados, tendo como referências as classes de materiais disponíveis atualmente no mercado. Fatores como qualidade, custo e segurança devem ser sempre levados em consideração durante o desenvolvimento do produto e do seu respectivo processo de fabricação. Para o projeto de pesquisa em questão será utilizado o processo FDM e a

matéria-prima utilizada para a fabricação do protótipo do dispositivo de estereofotogrametria será o PLA (Poli ácido láctico) (COELHO et al, 2018) e (SANTANA et al, 2018). O PLA é um material que possui uma certa versatilidade na Impressão 3D, tendo também um custo-benefício condizente, além de ser proveniente de fontes renováveis que conferem ao meio-ambiente aspectos positivos quanto à sua preservação (SANTANA et al, 2018). Estudos comparativos entre materiais utilizados na manufatura aditiva já existem, onde vantagens e desvantagens são abordadas, como por exemplo o estudo feito por SANTANA et al (2018), em que compara o PLA com o PETG, pelo ponto de vista da caracterização térmica, química e mecânica e REZENDE (2018), que faz a comparação entre ABS e PLA. Somente para fins de comparação consta na figura abaixo a análise comparativa entre PLA e PETG, de acordo com a sua caracterização mecânica.



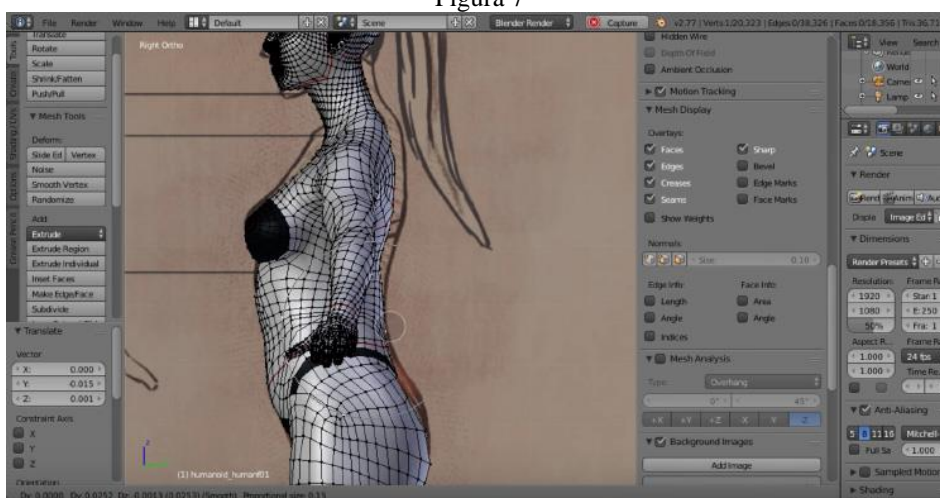
Médias da tensão máxima (a) e da deformação na tensão máxima (b) – Fonte: SANTANA et al (2018)

Porém o objetivo do nosso projeto de pesquisa não está focado quanto aos materiais utilizados em AM, mas sim o desenvolvimento de um processo de estereofotogrametria, visando a possibilidade de otimização do mesmo em conversões de imagens 2D para um objeto em 3D em que a fabricação deste objeto será feita utilizando uma impressora 3D alocada em laboratório de pesquisa, de acordo com os recursos existentes.

2.4 MODELAGEM TRIDIMENSIONAL (3Dm)

A modelagem 3D (3Dm) é uma técnica desenvolvida em computação gráfica para produzir uma representação digital 3D de qualquer objeto ou superfície. Através do uso de um software especial para manipular pontos no espaço virtual (vértices), é possível produzir uma malha: uma coleção de vértices que darão forma a um objeto, como retrata a Figura 7. Esses pontos são mapeados em uma grade 3D e unidos como formas poligonais. Cada ponto ou vértice tem sua própria posição na grade e, combinando esses pontos em formas, a superfície de um objeto é criada. Alguns programas de modelagem 3D permitem também a criação de imagens 2D pelo processo de renderização em 3D. Essa técnica permite criar cenas hiper-realistas usando algoritmos de iluminação (ANDALÓ, AMMERAAL).

Figura 7



Modelo 3D sendo criado no software Blender, a partir de um desenho a mão. O núcleo de um modelo é a malha que é melhor descrita como uma coleção de pontos no espaço.

Em geral, objetos 3D são criados manualmente, deformando a malha ou manipulando vértices, podendo ser aplicados a uma variedade de mídias, incluindo videogames, filmes, arquitetura, ilustração, engenharia e publicidade comercial. A técnica é capaz de produzir um objeto digital possível de ser totalmente animado, tornando-o um processo essencial para a animação de personagens e efeitos especiais (ANDALÓ).

Um modelo 3D permite incorporar dados em tempo real e interagir com o objeto virtual. Assim como um modelo físico, o objeto pode ser girado, invertido, explodido ou manipulado de várias maneiras. Além de se obter uma representação visual de um objeto, é possível alcançar sua renderização precisa, fornecendo muitos detalhes técnicos (AMMERAAL, FRIGERI).

A 3Dm possibilita principalmente um planejamento preciso de um projeto, evitando custos de produção e a possibilidade de identificar ou estudar falhas na integridade da sua estrutura, bem como

a visualização e interação do modelo com o mundo real, o que permite realizar simulações que podem servir de ponto de partida para a produção definitiva da estrutura.

O uso da 3Dm está fortemente relacionado a várias profissões e aplicações. Engenheiros e arquitetos o usam para planejar e projetar seu trabalho. Animadores e designers de jogos confiam na modelagem 3D para dar vida a suas ideias, bem como filmes usam modelagem 3D para efeitos especiais, para cortar custos e acelerar a produção. Devido ao seu valor, existe um extenso mercado para modelos 3D. Sites como *TurboSquid* e *CGTrader* oferecem modelos e pacotes 3D individuais. Artistas 3Dm podem trabalhar individualmente ou em equipe para criar esses ativos e distribuí-los para uso em uma variedade de projetos.

Modelos 3D podem ser divididos em três tipos principais (AMMERAAL, FRIGERI):

Modelos 3D de malha ou com estrutura de arame (wireframe)

A construção deste modelo consiste em redes de fios, conectadas para criar determinadas formas construídas a partir de uma combinação de linhas e arcos. Todas as superfícies são transparentes, tornando tudo visível em segundo plano na tela do computador.

Modelos com superfície ou texturas

Os modelos 3D com superfície consistem de modelos de malha recobertos com texturas de superfície, onde convenientes. As texturas podem ser adicionadas em diferentes ângulos para criar as formas desejadas. Também é possível separar e unir as superfícies para fazer outras modificações. Na ocorrência de superfícies opacas ou translúcidas, as áreas de fundo são obscurecidas, criando uma representação visual mais realista.

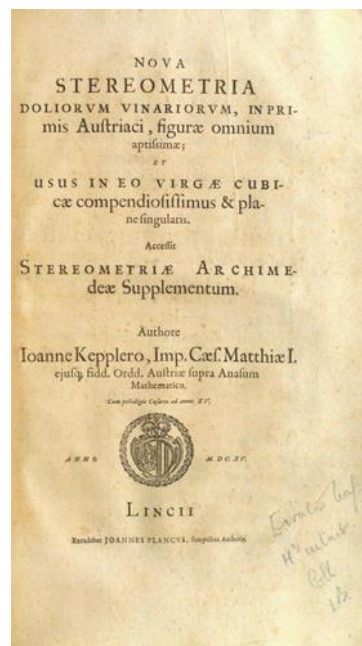
Modelos 3D sólidos

O tipo de modelagem 3D mais exigente em termos de computação são os modelos 3D sólidos. Este tipo de modelo incorpora mais pontos de dados do que qualquer outro, pois pode incluir peso, densidade do material, centro de gravidade, estresse mecânico, entre outros. Além de um modelo sólido ser o mais realista, ele também é o mais amplamente usado na engenharia para criar protótipos.

As primeiras ideias e formas de modelagem tridimensional remontam os conceitos de geometria com Euclides, no século III, quando apresentou as primeiras formas gráficas na sua obra *Elementos*. Ainda assim, existem registros de conceitos rudimentares de geometria cerca de 1000 anos antes de Cristo, na Mesopotâmia e Grécia antiga, em estudos de metafísica e religião (*Mathematic*). O grande objetivo de estudiosos e matemáticos era como criar uma forma de visualizar objetos tridimensionais em uma forma plana, que permitisse registrar isso no papel. Em 1220,

Leonardo Fibonacci lança o livro *Mis practica geometriae* (Prática de Geometria) com uma compilação da geometria do tempo e as primeiras ideias de trigonometria (*MacTutor History of Mathematics archive*). Então, René Descartes, nos anos 1600, apresenta a Geometria Analítica, também conhecida como geometria de coordenadas, que permitiu rastrear com precisão distâncias e locais. Em 1615, Kepler apresenta o livro *Stereometria* (stereo: volume; metria: medida) onde determina o volume de alguns sólidos e as áreas de certas superfícies, recorrendo ao cálculo infinitesimal, como apresentado na Figura 8 (*MacTutor History of Mathematics archive*).

Figura 8



Capa do livro *Stereometria* de autoria de Johann Kepler.

Somente anos mais tarde, em meados do século 18, o matemático inglês James Joseph Sylvester inventou a matemática matricial, que é extensivamente usada em computação gráfica. Foi na década de 1930 que o britânico Alan Turing formulou um modelo teórico que seria responsável pela criação de conceitos como o algoritmo e o desenvolvimento dos computadores modernos: a Máquina de Turing. O dispositivo deveria escrever e interpretar símbolos limitados em 0, 1 e conjunto vazio — basicamente, a estruturação das linhas de códigos de programação usadas nos computadores atuais. Turing também colaborou com as forças americanas para quebrar a codificação alemã de mensagens usadas na Segunda Guerra Mundial (*Mathematic*).

A história da 3Dm tem relação direta com o desenvolvimento da tecnologia para computadores. Os primeiros computadores capazes de apresentar imagens em um sistema de tubo de

raios catódicos em tempo real surgiram em 1951, ainda que não fossem digitais, em projetos envolvendo a marinha americana e o MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). O termo “gráficos de computador” (*computer graphics*) é cunhado pela primeira vez por William Fetter em 1960. Nesta mesma época em 1961, o dr. Patrick J. Hanratty, renomado cientista da computação, ingressa nos laboratórios de pesquisa da *General Motors* e ajuda a desenvolver o DAC, *Design Automated by Computer*. Mas é Douglas T. Ross, pioneiro da ciência da computação e pai da usinagem computadorizada que cunha o termo CAD (*Computer Aided Design*). Neste mesmo período já começam a surgir os primeiros computadores pessoais, completamente diferentes do que conhecemos hoje: não possuíam processador central e precisavam ser montados, de acordo com kits de eletrônica (*HISTORY OF COMPUTER GRAPHICS*).

A primeira vez que um sistema de software gráfico interativo surge é por meio do doutorado de Ivan Sutherland, no MIT, em 1961, criando o *Sketchpad*. Neste programa, o usuário interagia diretamente com a tela, através de uma caneta óptica, conforme mostra a Figura 9 (*HISTORY OF COMPUTER GRAPHICS*).

Figura 9



Uso do software *Sketchpad* por meio de caneta óptica diretamente na tela do computador.

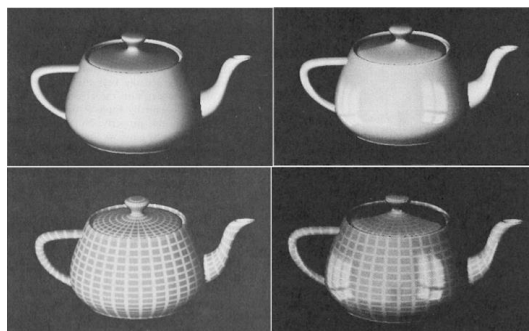
As ferramentas CAD começaram a ser utilizadas neste mesmo período para criação de aeronaves, automóveis e componentes eletrônicos. Um dos programas CAD, que foi base para os outros, foi o UNISURF, desenvolvido pelo engenheiro francês Pierre Bézier, da fabricante de carros *Renault*. Mais tarde, muitos destes pesquisadores foram recrutados para a Universidade de Utah, que se tornou uma referência em termos de computação gráfica com um laboratório dedicado para área. Neste laboratório são desenvolvidos os primeiros modelos computadorizados em 3 dimensões. As

grandes empresas também passam a criar departamentos especificamente voltados para computação gráfica e CAD (*Computer Graphics – University of California*).

Já na década de 70, com o advento do circuito integrado, tornou-se possível centralizar a CPU (unidade central de processamento) em um único chip, dando origem ao microprocessador. Os gráficos de computador ganharam grande impulso, inclusive dando origem a Atari, em 1972, permitindo usar o computador como uma forma de jogo em vídeo: o videogame. Surgem também as primeiras empresas voltadas para animação com departamentos voltados para computação gráfica com o objetivo de fazer seu uso em filmes, bem como as primeiras conferências centradas exclusivamente em computação gráfica, na pesquisa em modelagem 3D e seus algoritmos. Em 71, Hanratty introduz o software CAD, conhecido como *Automated Drafting and Machinery*, ou ADAM. Outras aplicações CAD já começam a ser desenvolvidas, ainda que muito rudimentares. Nesta mesma década, Steve Wozniak e Steve Jobs desenvolvem o que se tornaria o primeiro computador Apple, bem como, William “Bill” Gates cria a Microsoft. Quase no fim da década de 70, a empresa francesa *Dassault Systèmes* desenvolve o CATIA (*Computer Aided Three-dimensional Interactive Application*), sendo largamente comercializado. O Apple II é lançado em 1977, montado e com teclado integrado, gráficos coloridos, sons, gabinete de plástico e oito *slots* de expansão (*Computer Graphics – University of California*).

A pesquisa em 3Dm continua, com Gouraud e Phong criando técnicas de sombreamento na Universidade de Utah que aceleraram o processamento, simplificando os algoritmos originais de renderização e obtendo melhores resultados visuais em luz, reflexão e sombreamento (PHONG, 1973). Neste mesmo período a Universidade de Utah continuou suas pesquisas na área de computação gráfica e 3Dm, desenvolvendo formas mais eficientes de visualização de modelos 3D. Um item de interesse foi o modelo de bule de chá de Utah. Ele apareceu na história como o símbolo da computação gráfica em 3D depois de ter sido usado por Martin Newell para testar sua pesquisa gráfica. Ele achou o modelo de bule 3D ideal para testes por causa de sua estrutura, variedade de superfícies que possuía e capacidade do item de projetar sombras sobre si mesmo. Ele compartilhou os detalhes com seus colegas pesquisadores que imediatamente começaram a usar o bule de chá que, mais tarde, ficou conhecido como bule de Newell ou bule de Utah, retratado na Figura 10.

Figura 10



O bule de chá conforme retratado no artigo de Newell. Ele exibiu vários aprimoramentos na renderização realista: além de renderizar o bule de chá simples (canto superior esquerdo), ele poderia renderizá-lo como brilhante, estampado ou ambos

A década de 80 traz ainda mais desenvolvimentos para a indústria da tecnologia computadorizada. Em 12 de agosto de 1981, a IBM lança seu primeiro computador voltado para o usuário final: o IBM PC 5150, com preço de US\$ 1565. Ele era o modelo mais barato lançado pela empresa e era voltado tanto para escritórios como para uso doméstico. A entrada da IBM no mercado de computadores pessoais muda completamente o mercado de computadores, influenciando-o de diversas formas. O IBM PC precisava de um sistema operacional para poder ser utilizado, o que levou a firmar uma parceria com a Microsoft. Ao assinar o contrato de licenciamento do DOS (*Disk Operating System* - Sistema Operacional de Disco) para a IBM. Este contrato tornou a Microsoft uma gigante do mercado da computação (*Computer Graphics – University of California*).

Em 1982, John Walker funda a empresa *Autodesk* e, um ano depois, lança o AutoCAD, o primeiro programa CAD significativo para PCs. Em 24 de janeiro de 1984, surgiu o Macintosh, o primeiro computador de sucesso com uma interface gráfica amigável, usando ícones, janelas e mouse. Sua acolhida foi extremamente entusiástica, em grande parte devido às campanhas publicitárias em massa realizadas pela Apple. No ano seguinte, a empresa *Diehl Graphsoft* foi fundada e já começa a vender o MiniCAD, que se tornou rapidamente o CAD mais vendido para sistemas Mac. Com o crescente uso do sistema operacional UNIX os softwares CAD da *Dassault Systèmes* e da *Unigraphics* começaram a ter suas versões para este sistema. Um grande avanço nos Softwares CAD foi o lançamento do Pro/Engineer da *Parametric Technology* em 1988, atualmente conhecido como PTC Creo, que trouxe um grande aproveitamento de construção de sólidos paramétricos, baseados em recursos e modelagem associativa de sólidos. Nesta mesma década, a indústria do entretenimento passa a usar extensivamente ferramentas de computação gráfica, destacando-se animação e modelagem 2D e 3D. Empresas como *Industrial Light and Magic* (ILM) que já despontava forte no

mercado é dividida, dando origem a Pixar. Também é inventada a técnica de estereolitografia (SLA), permitindo a produção de peças camada por camada. Embora tenha sido desenvolvida em 1984, a primeira máquina que a utilizou foi lançada em 1992. Essa máquina usava um material fotopolimérico à base de acrílico que ao ser atingido por um laser UV transforma-se em plástico sólido (*HISTORY OF COMPUTER GRAPHICS*).

Na década de 90, a indústria de videogames deu um grande empurrão para a computação gráfica e 3Dm. Começam a surgir os primeiros hardwares de aceleração gráfica 3D de alta performance para computadores pessoais. Enquanto isso, a evolução do software baseado em CAD é contínua, surgindo soluções inovadoras de projeto, como BIM (*Building Information Modelling*) e a prototipagem digital. Essas técnicas visam fornecer um protótipo digital completo, capaz de ser utilizado para testar forma, ajuste e função. É uma verdadeira simulação digital do produto final completo e pode ser utilizado na prática para otimizar e validar um produto de modo a reduzir a necessidade de construir protótipos físicos onerosos. Surgem também os softwares gratuitos e de código aberto como o *Blender* visando permitir acesso a modelagem 3D com custo zero (*HISTORY OF COMPUTER GRAPHICS*).

No início dos anos 2000, um primeiro órgão sintético produzido por impressão 3D é implantado em uma pessoa nos Estados Unidos: uma bexiga sintética. A partir daí projetos *open source* para construção de impressoras 3D começam a aparecer na Internet, destacando-se o RepRap, que foi financiado por internautas. A impressora Darwin foi lançada em 2008 com seu sistema baseado na impressão por filamento. A modelagem 3D para impressão foi desenvolvida para atender ao interesse das revistas em usar modelos 3D para artigos.

É possível observar que diversas áreas contribuíram para 3Dm, desde a pesquisa acadêmica até esforços pessoais e a busca por novas formas de entretenimento. A 3Dm é ainda considerada uma técnica de difícil aprendizado, requisitando alta dedicação e tempo no uso de ferramentas de manipulação 3D.

3 METODOLOGIA

Para a realização do presente artigo foi aplicada uma metodologia baseada em referencial teórico consistente, onde utilizamos as seguintes bases de dados para a nossa pesquisa: SciELO, BDTD

(Biblioteca Digital de Teses e Dissertações) e Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Através do levantamento bibliográfico constatamos achados relevantes para o desenvolvimento do tema em estudo. Estes temas serão abordados quanto a sua origem, histórico, processos, acessórios e suas relações. A pesquisa da modelagem 3D procurará também focar em problemas típicos enfrentados pela modelagem direcionada a impressão 3D. Isto permitirá explicar de forma estruturada o estado da arte sobre o tema em estudo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estado da arte das técnicas estudadas para realização deste trabalho é extenso e se encontra em pleno desenvolvimento. Uma vez que a história e conceitos fundamentais dos processos e métodos se tornam conhecidos, será possível aplicá-los de modo mais adequado levando em consideração as devidas limitações e os inúmeros testes necessários para a produção de um sistema de baixo custo capaz de criar e renderizar objetos tridimensionais a partir de imageamento bidimensional.

REFERÊNCIAS

O Mundo da Usinagem. Ano 20, Edição 121.

O Mundo da Usinagem. setembro / 2016, Edição 112.

O Mundo da Usinagem. agosto / 2015, Edição 106.

TEMBA, Plínio. *Fundamentos da Fotogrametria*. Departamento de Cartografia – UFMG, 2000.

CARNEIRO DA SILVA, Daniel. In: Revista Brasileira de Geomática, v. 3, n. 2, pg. 81 – 96, jul / dez 2015. *Evolução da Fotogrametria no Brasil*.

ROSALEN, David Luciano. *Estudo do Processo de Captação de Imagens Aplicado à Fotogrametria Digital*. USP-EESC Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, 1997.

ZHOU, S., JUDKINS, P., YE, P., *Methods and systems for converting 2d motion pictures for stereoscopic 3D exhibition*, patent nº 8.411,931 B2 US, 2013.

FURUKAWA Y., HERNÁNDEZ, C., *Multi-View Stereo: A Tutorial*, Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, V. 9, I. 1-2, 2013, (1 – 137). Now Publishers.

COLLINS, A., HALVERSON, R., *Rethinking Education in the Age of Technology: The Digital Revolution and Schooling in America.*, 2018, Teachers College Press.

Why Google Doesn't NEED Sketchup Anymore – MasterSketchup.com www.mastersketchup.com, 07, julho de 2012.

LADEIRA, Pedro Ribeiro Soares et al. In: Revista Bras Cir Plast, v. 28, n. 1, pg. 147 – 155, 2013. *Uso da Estereofotogrametria nas Deformidades Craniofaciais: Revisão Sistemática*.

COELHO, Arthur Wilson Fonseca et al. In: Revista Matéria, v. 23, n. 4, 2018. *Manufatura aditiva por estereolitografia: análise da geometria da peça e da influência da posição e orientação de fabricação*.

SANTANA, Leonardo et al. In: Revista Matéria, v. 23, n. 4, 2018. *Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica*.

REZENDE, Stéfany Mayara Ferreira. *Estudo e Caracterização de Componentes Confeccionados por Manufatura Aditiva*. 2018. 134 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) – Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, Universidade Federal de Goiás, Catalão.

KIPNIS, Renato; SANTOS, Helder Bruno Cipriano dos; TIZUKA, Michelle Mayumi; ALMEIDA, Miguel Jorge Gomes Tavares de; CORGA, Mônica Patrícia de Almeida e Silva. In: Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas, v. 8, n. 3, pg. 605 – 619, 2013. *Aplicação das*

tecnologias de modelagem 3D conjugada às técnicas tradicionais para o registro das gravuras rupestres do Rio Madeira, Rondônia, Brasil.

BARROS, Gutemberg Xavier da Silva. *Modelagem Digital Tridimensional Para o Desenvolvimento de Prototipagem*. 2012. 176 f. Dissertação (Mestrado em Design e Ergonomia) – Programa de Pós-Graduação em Design, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

CONGRESSO INTERNACIONAL DE CONHECIMENTO E INOVAÇÃO, 7., 2017, Foz do Iguaçu. *Indústria 4.0: Competências Requeridas aos Profissionais da Quarta Revolução Industrial*. CIKI, setembro de 2017. 15p.

FREITAS, Arnold de Araújo. *A Internet das Coisas e seus Efeitos na Indústria 4.0*. 2017. 57 f. Monografia (Bacharelado em Tecnologia de Sistemas de Computação) – Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro.

CARMONA, André Loch Mesons. *Análise dos Impactos da Indústria 4.0 na Logística Empresarial*. 2017. 70 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Transportes e Logística) – Universidade Federal Santa Catarina, Santa Catarina.

SANTOS, B. P et al. In: Revista Produção e Desenvolvimento, v. 4, n. 1, 2018. *Indústria 4.0: Desafios e Oportunidades*.

Mathematics – Encyclopædia Britannica, <https://www.britannica.com/science/mathematics>, 29 de maio 2019

MacTutor History of Mathematics archive – School of Mathematics and Statistics, University of St Andrews, Scotland – <http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/>, maio de 2019.

PHONG, B. T. *Illumination of Computer-Generated Images*, Department of Computer Science, University of Utah, UTEC-CSs-73-129, July 1973.

HISTORY OF COMPUTER GRAPHICS – <https://web.archive.org/web/>, 6 de fevereiro de 2019

Computer Graphics – University of California – Berkeley, <http://graphics.berkeley.edu/>, dezembro de 2018.

AMMERAAL, Zhang. *Computação Gráfica para Programadores Java*, 2ª edição. [Minha Biblioteca]. Retirado de <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-1918-5/>

FRIGERI, Rovena, s. *Computação Gráfica*. [Minha Biblioteca]. Retirado de <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595026889/>

ANDALÓ, Flávio. *Modelagem e Animação 2D e 3D para Jogos*. [Minha Biblioteca]. Retirado de <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536519425/>