

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO EDUARDO BUGNO DALZUCHIO

ANÁLISE DE FATORES DE FORMA APLICADOS A MANUFATURA ADITIVA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

JOÃO EDUARDO BUGNO DALZUCHIO

ANÁLISE DE FATORES DE FORMA APLICADOS A MANUFATURA ADITIVA

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Dalmarino Setti

PATO BRANCO

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE FATORES DE FORMA APLICADOS A MANUFATURA ADITIVA

João Eduardo Bugno Dalzochio

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 14/11/2017 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Profa. Me. Silvana Patricia Verona
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Dalmarino Setti
(UTFPR – Departamento de Mecânica)
Orientador

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha irmã, *"In Memoriam"*, que também tinha o sonho de tornar-se engenheira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

Agradeço aos meus pais por ter tornado esse sonho uma realidade, e por sempre batalharem junto comigo, enfrentando dificuldades, e acima de tudo acreditando em mim.

Agradeço minha Avó Joanita Pereira Bugno pelo apoio incondicional.

Agradeço a toda minha família, irmão, tios, primos e sobrinha por estarem sempre juntos nos momentos bons e ruins.

Agradeço minha Tia Avó Genoveva Bugno, *"In Memoriam"*, que sem seu apoio eu não teria chegado até aqui.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Dalmarino Setti pela confiança e por acreditar em minha capacidade.

E por final agradeço aos amigos da república "Credo Lurde" e da "Chácara dos Avós", pois sempre estivemos juntos nesses dois últimos anos.

EPÍGRAFE

“ Nosso maior medo não é sermos inadequados. Nosso maior medo é não saber que nós somos poderosos, além do que podemos imaginar. É a nossa luz, não nossa escuridão, que mais nos assusta. ”

(Marianne Williamson)

RESUMO

DALZOCHIO, João E.. Análise de fatores de forma aplicados a manufatura aditiva. 2017. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

A presente pesquisa adapta fatores de forma e relaciona a complexidade de peças com o tempo e custo da fabricação por Manufatura Aditiva, com a finalidade de obter dados de complexidade a partir do modelamento em software CAD, e relacioná-los com o tempo de fabricação, mostrando que em casos de peças mais complexas a utilização destes métodos de fabricação é recomendada. Para isto será realizada uma abordagem quantitativa ao problema, na qual as informações e resultados, serão obtidos através de simulações de impressão. Os resultados demonstram que a complexidade que melhor demonstra o comportamento do tempo é a complexidade em volume e que o posicionamento na mesa de impressão, bem como a densidade de preenchimento tem influência direta no tempo fabricação. Com isso é possível afirmar que a complexidade de peças tem uma relação direta com o tempo de impressão, sendo assim futuramente, a partir da complexidade, possível definir quais melhorias podem ser realizadas em um determinado design de peça a fim de otimizar seu tempo de produção.

Palavras-chave: Tempo, Custo, Complexidade, Peça, Fabricação, Manufatura Aditiva

ABSTRACT

DALZOCHIO, João E.. Analysis of form factors applied to additive manufacturing 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

The present research adapts form factors and relates the complexity of parts with the time and cost of manufacturing by Additive Manufacturing, in order to obtain complexity data from CAD modeling, and relate them to manufacturing time, shown that in cases of more complex parts the use of these manufacturing methods is recommended. For this, a quantitative approach to the problem will be carried out, in which information and results will be obtained through print simulations. The results demonstrate that the complexity that best demonstrates the behavior of time is the complexity in volume and that the positioning at the printing table as well as the fill density has direct influence on the manufacturing time. With this it is possible to affirm that the complexity of parts has a direct relation with the time of printing, being thus, from the future, from the complexity, it is possible to define which improvements can be realized in a certain part design in order to optimize its time of production.

Keywords: Time, Cost, Complexity, Part, Manufacturing, Manufacturing Additive

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Funcionamento da tecnologia FDM	16
Figura 2 - Fluxograma entre processo e produto	17
Figura 3 - Fluxograma de iteração no processo de fundição	18
Figura 4 - Modelo do estudo de caso	26
Figura 5 - Conjunto de peças modeladas.....	27
Figura 6 - Simulação de fabricação do cilindro.....	29
Figura 7 - Maior distância percorrida no eixo z.....	30
Figura 8 - Menor distância percorrida no eixo z.	30
Figura 9 - Tempo em função da complexidade em volume.....	31
Figura 10 - Tempo em função da complexidade em área	32
Figura 11 - Tempo em função do fator de complexidade	32
Figura 12 - Custo em função da complexidade	34
Figura 13 - Variação de complexidade para uma mesma peça	34
Figura 14 - Gráfico do tempo em função da complexidade.....	36
Figura 15 - Custo em função da complexidade	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atributos geométricos de complexidade de forma	20
Tabela 2 - Parâmetros de simulação.....	25
Tabela 3 - Volume e área de impressão	27
Tabela 4 - Volume e área de cada peça	28
Tabela 5 - Resultados de complexidade	28
Tabela 6 - Estatísticas de impressão	31
Tabela 7 - Densidade dos materiais utilizados	33
Tabela 8 - Massa e custo de cada peça.....	33
Tabela 9 - Volume e área em função da complexidade	35
Tabela 10 - Resultados de complexidade para uma única peça	35
Tabela 11 – Estatísticas de impressão em função da variação da complexidade com 100% de preenchimento	35
Tabela 12 - Estatísticas de impressão em função da variação da complexidade com 20% de preenchimento	36
Tabela 13 - Massa e custo para a mesma peça.....	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	12
2 REFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
2.1 MANUFATURA ADITIVA.....	15
2.2 MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO (<i>FDM</i>).....	15
2.3 POLÍMEROS	16
2.3.1 Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS)	16
2.3.2 Ácido Polilático (PLA)	17
2.4 PROJETO DE FUNDIÇÃO (<i>DESIGN FOR CASTING – DFC</i>).....	17
2.5 CRITÉRIOS PARA AVALIAR A COMPLEXIDADE DE FORMA	20
2.6 SOLIDIFICAÇÃO DIRECIONAL.....	22
2.7 CONCEPÇÃO DE FORMA	22
3 METODOLOGIA	23
3.1 FATORES DE FORMA.....	23
3.1.1 Fator de forma em volume e área	23
3.1.2 Fator de forma em complexidade	24
3.2 MODELAGEM 3D DE COMPONENTES.....	24
3.3 SIMULAÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA.....	25
3.4 ESTUDO DE CASO	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1 RESULTADOS DA COMPLEXIDADE DE FORMA	27
4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE MANUFATURA ADITIVA	28
4.3 ESTUDO DE CASO	34
5 CONCLUSÃO	39
REFERÊNCIAS	41
ANEXO A – PARTE DO MANUAL DA IMPRESSORA UTILIZADO	43

1 INTRODUÇÃO

As principais vantagens apresentadas pela utilização de critérios de complexidade de forma estão relacionadas com a agilidade no desenvolvimento de novos produtos, redução de custos de fabricação, integração com recursos de manufatura aditiva e melhoria de desempenho dos componentes. Segundo Gardan *et. al* (2015) melhorar o volume de material e a massa global do produto é um objetivo essencial em torno da integração da simulação no processo de Manufatura Aditiva (*AM - Additive Manufacturing*). Além disso, esse tipo de processo de fabricação permite o projeto de objetos inovadores e o uso de critérios de complexidade de forma neste contexto pode criar uma combinação muito interessante.

A utilização de critérios para avaliar a fundibilidade, que tem como objetivo melhorar o projeto de peças com alta complexidade e redução de custos de fundição, a partir de informações obtidas do modelamento 3D e das simulações de solidificação da peça a ser analisada.

Com o crescimento da demanda global por produtos e serviços, muitas empresas estão buscando no avanço da tecnologia, a redução de custos e otimização de tempo na produção de produtos e bens de consumo, uma das tecnologias que estão sendo utilizadas é a de Manufatura Aditiva também conhecida como prototipagem rápida, onde hoje já é possível realizar a prototipagem com polímeros e metais. Porém, por ainda ser uma tecnologia pouco utilizada não existem parâmetros que determinem como devemos proceder no design dos produtos prototipados. Ainda segundo Jian-Yuan Lee *et al.* (2017) a manufatura aditiva está surgindo como uma tecnologia competente para uma vasta série de atuais aplicações e deve ser considerada para cada aplicação específica os materiais disponíveis, a velocidade de fabricação e a resolução dos processos.

O processo começa com a obtenção de um *design* virtual criado por *software* de modelagem ou desenho auxiliado por computador CAD (*Computer Aided Design*). A máquina de impressão 3D então lê os dados do desenho em CAD e deposita camadas sucessivas de material líquido, em pó ou folha, criando o modelo físico a partir de uma série de seções transversais. Essas camadas, que correspondem à seção transversal virtual do modelo em CAD, são combinadas automaticamente para criar a forma final. A Manufatura Aditiva usa o formato de arquivo STL (*Standard Triangle Language*), que fatia a peça em partes infinitamente

menores pois aproxima a forma de uma peça ou de um conjunto através de facetas triangulares. Em geral, os sistemas de Manufatura Aditiva podem produzir modelos 3D em apenas algumas horas. Ainda assim, a variação pode ser muito grande dependendo do tipo da máquina usada, do tamanho e do número de modelos produzidos. (STRATASYS, 2017a)

Embora a maioria dos processos de prototipagem rápida em uso hoje já fossem conhecidos em 1991, a maioria deles ainda estavam em fase de desenvolvimento pré-comercial. Os sistemas de prototipagem rápida mais populares hoje são Stereolitografia (SL), modelagem de deposição fundida (FDM), jato de tinta (IJP), Fabricação de Objetos Laminados (LOM) e Sinterização Seletiva a Laser (SLS). (KRUTH; LEU; NAKAGAWA, 1998)

Devido aos altos custos de aquisição de máquinas de manufatura aditiva, o planejamento e a programação de peças a serem processadas nessas máquinas desempenham um papel vital na redução de custos operacionais, oferecendo serviços a clientes com menor preço e aumentando a rentabilidade de empresas que prestam esses serviços. (LI; KUCUKKOC; ZHANG, 2017)

A Manufatura Aditiva permite a fabricação de geometrias complexas, que são muito difíceis de construir com a produção clássica. (GARDAN; SCHNEIDER, 2015). Com isso definiremos fatores de forma com base nas equações de complexidade do projeto de fundição onde também poderemos chamá-los de complexidade de forma, pois estarão diretamente relacionados ao nível de detalhes de uma peça.

Assim serão apresentados fatores que influenciam no tempo de impressão, e também critérios que visam a otimização do *design* com base no projeto para fundição (*Design for Casting – DFC*).

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso é avaliar se fatores de forma com base na complexidade são adequados **na modelagem de componentes a serem fabricados por Manufatura Aditiva por deposição fundida** (*Fused Deposition Modeling – FDM*).

Os objetivos específicos deste trabalho são: (i) identificar características relevantes para a fabricação por Manufatura Aditiva por deposição fundida (FDM); (ii)

avaliar a complexidade de forma com critérios que possam ser obtidos a partir de informações do modelamento 3D dos protótipos; (iii) mensurar o tempo de fabricação por Manufatura Aditiva; (iv) comparar diferentes critérios de complexidade de forma; (v) avaliar o comportamento do tempo em relação a complexidade para peças fabricadas por Manufatura Aditiva

2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

2.1 MANUFATURA ADITIVA

O termo Manufatura Aditiva refere-se a uma classe de tecnologias que podem construir modelos físicos a partir de dados CAD ou um grupo de técnicas utilizadas para fabricar rapidamente um modelo em escala de uma peça. As impressoras tridimensionais permitem aos designers criar rapidamente protótipos dos seus desenhos em vez de imagens bidimensionais. (MAHINDRU; MAHENDRU, 2013)

A Manufatura Aditiva é uma tecnologia inovadora desenvolvida nas duas últimas décadas. Seu objetivo é produzir rapidamente protótipos para inspeção visual, avaliação ergonômica, ajuste de forma e produção de ferramental e para ajudar a acelerar o processo de desenvolvimento. Apesar das vantagens, as tecnologias de Manufatura Aditiva atuais estão longe do ideal. A qualidade dos protótipos e o desempenho de um processo de prototipagem é afetado por uma gama de parâmetros. Não é uma tarefa fácil escolher uma combinação adequada destes parâmetros para fabricação de um protótipo, que depende da qualidade e de requisitos, tais como precisão, tempo de construção, resistência e eficiência de fabricação. (CHOI; CHEUNG, 2008)

Para Modeen (2005) o processo de fabricação por Manufatura Aditiva apresenta algumas vantagens como pontos fortes, sendo a capacidade de produzir formas tridimensionais complexas e detalhadas a principal delas. Ainda segundo ele alguns pontos fracos são observados, como a velocidade de produção de um protótipo, que depende dos requisitos de qualidade e tamanho, bem como a limitação dos equipamentos que atualmente só podem fabricar itens de até 500 mm³ dependendo do material a ser utilizado.

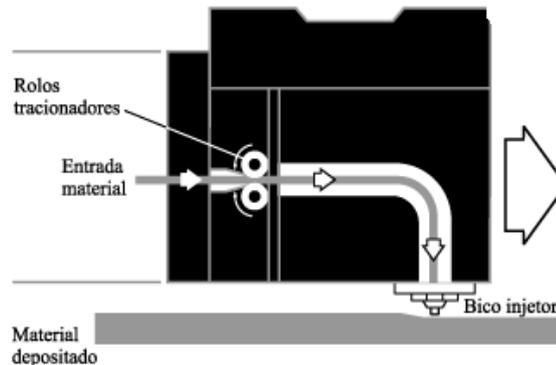
Apesar da ampla gama de tecnologias de prototipagem rápida esta pesquisa limita-se ao estudo e análise da modelagem por deposição fundida (*Fused Deposition Modeling – FDM*).

2.2 MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO DE MATERIAL FUNDIDO (FDM)

As impressoras 3D baseadas na tecnologia FDM produzem as peças camada por camada, de baixo para cima, ao aquecer e extrudar um filamento termoplástico conforme mostra a figura 3. O software de preparação de montagem

divide e posiciona um arquivo de CAD 3D e calcula um caminho para a extrusão do termoplástico e qualquer material de suporte necessário. A impressora 3D aquece o termoplástico em um estado semilíquido e o deposita na forma de gotículas ultrafinas ao longo do caminho de extrusão, a figura 1 representa o esquema de funcionamento da tecnologia FDM. (STRATASYS, 2017b)

Figura 1 - Funcionamento da tecnologia FDM



Fonte: Adaptado (MONTERO; ROUNDY; ODELL, 2001)

2.3 POLÍMEROS

Na sequência é feita uma revisão dos polímeros a serem contemplados nesse trabalho.

2.3.1 Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS)

O Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) é um polímero amorfo produzido através de polimerização por emulsão ou massa do acrilonitrilo e estireno na presença de polibutadieno. As propriedades mais importantes do ABS são a resistência ao impacto e a rigidez. O monómero de Estireno confere ao ABS boa processabilidade, o Acrilonitrilo rigidez, resistência térmica e química enquanto o butadieno torna o produto mais resiliente a baixas temperaturas. A alteração da proporção dos componentes do ABS e a adição de aditivos especiais permitem a produção de polímeros com propriedades específicas. O ABS possui fraca resistência às intempéries sendo que é recomendado apenas para aplicações interiores. O ABS pode ser processado através de moldação por injeção e extrusão. Suas principais aplicações são: brinquedos, bens de consumo, painéis interiores de automóveis, assentos, aspiradores, etc. (RESINEX, 2017a)

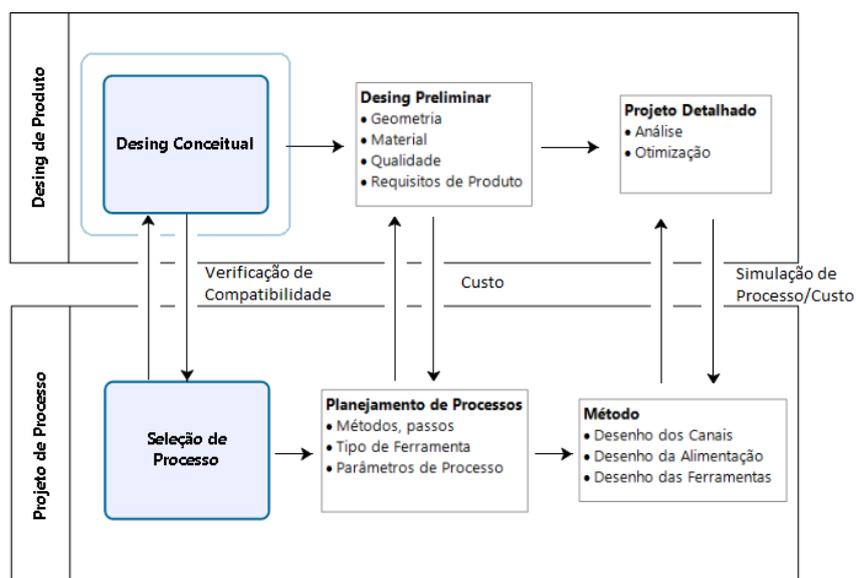
2.3.2 Ácido Polilático (PLA)

O PLA ou Ácido Polilático é fabricado a partir da dextrose (açúcar) extraídas de materiais de fontes renováveis. É o bioplástico ou biopolímero mais popular e o único atualmente produzido numa fábrica em escala mundial. O PLA pode ser comparado com o PET e fabricado da mesma forma (moldação sopro e termo formação). Pode ser utilizado em aplicações moldadas por injeção onde pode representar um substituto do poliestireno (PS). Este biopolímero é também adequado para extrusão de fibra onde pode apresentar-se como um substituto do polipropileno (PP). O PLA pode biodegradar em determinadas condições. Aplicações típicas do PLA (Ácido Polilático) são em: extrusão de fibra, moldação por injeção, termo-formação e moldação por sopro. (RESINEX, 2017b)

2.4 PROJETO DE FUNDIÇÃO (*DESIGN FOR CASTING – DFC*)

Segundo RAVI (2005) fundibilidade implica na facilidade de produzir uma peça por fundição, minimizando custo, defeitos e tempo de entrega. Isto é facilitado pela alta compatibilidade entre os requisitos do produto eo processo. Três aspectos do design do produto influenciam sua fundibilidade: seleção de materiais, planejamento de geometria e especificação de qualidade, conforme mostra a figura 2.

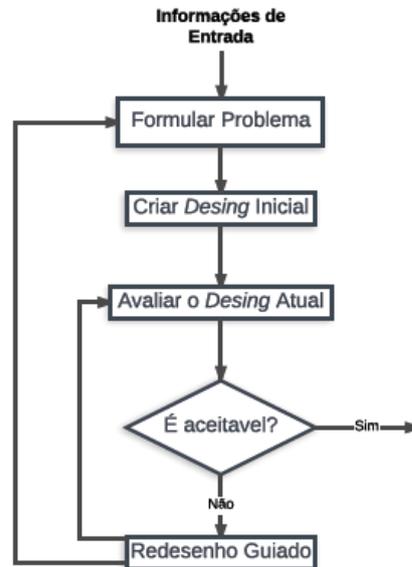
Figura 2 - Fluxograma entre processo e produto



Fonte: Adaptado (RAVI, 1999)

Conforme Lampman (2009) o projeto de fundição é um processo iterativo e pode ser verificado na figura 3 abaixo. O problema do *design* é tipicamente formulado em termos de requisitos funcionais e restrições.

Figura 3 - Fluxograma de iteração no processo de fundição



Fonte: Adaptado(LAMPMAN, 2009)

Os requisitos funcionais referem-se às funções que a peça deve fornecer enquanto as restrições se relacionam com os requisitos da forma (tamanho, acabamento e precisão), de processamento (linha de separação, espessura da seção) e requisitos que limitam a geometria que pode ser selecionada. Com base na formulação do problema, um design inicial é criado. Esse projeto é então avaliado e modificado iterativamente até que um projeto aceitável seja alcançado. (LAMPMAN, 2009)

Várias estratégias para melhorar o processo de projeto de fundição tradicional são possíveis com base nas perspectivas de projeto, estas são resumidas da seguinte forma: (i) desenhe a geometria de fundição e o processo de fundição como um sistema coordenado, integrando a otimização da forma e o projeto do sistema em um processo concorrente. Considere a geometria, material e as interações de processo; (ii) desenvolver uma compreensão completa de todas as necessidades do cliente, incluindo restrições de processamento antes de iniciar o projeto; (iii) foco em criar um projeto inicial aceitável, um grande número de extensas iterações de redesenho de análise são evitadas, assim a fase de avaliação deve confirmar a

concepção em vez de criá-la; (iv) use a simulação do processo de fundição e outros métodos modernos de análise e inspeção auxiliados por computador para otimizar o projeto; (v) desenvolver uma consistente base de ciência para o projeto de fundição sob a forma de diretrizes de projeto e metodologias estruturadas. (LAMPMAN, 2009)

O material é geralmente selecionado para satisfazer os requisitos funcionais do produto, com base em propriedades mecânicas, físicas e químicas, tais como resistência à tração, ponto de fusão e resistência à corrosão. Os metais fundidos são caracterizados por suas propriedades de fundição, como a temperatura de vazamento, a fluidez, a contração volumétrica durante a solidificação e tendência a formação de escória. As propriedades de fundição influenciam a qualidade da fundição em termos de estabilidade e integridade interna. (RAVI, 2005)

A geometria da peça afeta diretamente a complexidade e o número de elementos de ferramental e, portanto, seu custo. A localização da linha de separação depende da extensão dos entalhes, que por sua vez dependem das características internas da peça. A geometria da peça também influencia a solidificação direcional progressiva (de regiões finas a mais espessas para regiões mais espessas), que rege a integridade interna. As seções finas e longas são difíceis de encher. Superfícies críticas podem ser planejadas na seção de arrasto do molde para assegurar uma fundição suave sobre superfície livre de qualquer inclusão.

Em termos de geometria bons projetos de fundição geralmente seguem algumas diretrizes básicas: limitar mudanças drásticas de espessura minimiza tensões e auxiliar no processo de fundição; seções cônicas são usadas quando possível para ajudar a solidificação direcional; não sobrepor seções finas entre seções grossas; evitar grandes superfícies planas e horizontais; evite seções espessas isoladas que criam pontos quentes que são difíceis de alimentar; as dimensões críticas não devem atravessar linhas de divisão em moldes. Os projetistas também devem ter um bom conhecimento das características de fundição de ligas disponíveis, pois isso influencia as abordagens de projeto para trabalhar em torno de limitações de fundibilidade da liga. (LAMPMAN, 2009)

As especificações de qualidade incluem superfícies sem defeito, integridade interna, precisão dimensional e a rugosidade da superfície desejada. Alguns dos principais defeitos que levam à rejeição incluem, rachaduras, porosidade de gás, inclusões de areia e escória. Outros defeitos, como a micro porosidade,

imprecisão dimensional e superfície áspera só levarão à rejeição se a qualidade possuir especificações rigorosas.

Em geral, os problemas descobertos durante a fase de fabricação podem ser difíceis de corrigir, é muito mais fácil evitar tais problemas por pequenas modificações no projeto ou em desenhos de ferramentas. A solução está na estreita colaboração entre engenheiros a partir da fase de concepção.

2.5 CRITÉRIOS PARA AVALIAR A COMPLEXIDADE DE FORMA

Peças de metal em forma complexa com características internas e externas e espessura de parede variável são produzidas com maior economia por processo de fundição. Contudo, uma complexidade de forma mais elevada conduz a uma menor manufaturabilidade, implicando uma qualidade sub-ótima, um custo mais elevado e uma produtividade reduzida.

Segundo Almaghariz et al. (2016) o critério para medir a complexidade de uma peça é adotado a partir de um estudo prévio centrado na quantificação da complexidade de peças e de processos. Os atributos geométricos chave podem ser determinados a partir do modelo CAD da peça desejada, onde os atributos de complexidade são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Atributos geométricos de complexidade de forma

Dimensão da Peça (comprimento, largura, altura)	L, W, H
Volume da caixa de contorno	V_b
Volume da peça	V_p
Área de superfície da peça	A_p
Número de machos	N_c
Volume dos machos	V_c, i
Espessura da peça, mín. e máx.	$T_{min} e T_{max}$
Profundidade do desenho	D_d

Fonte: Adaptado (ALMAGHARIZ *et al.*, 2016)

De acordo com Almaghariz *et al.* (2016) as equações listadas abaixo são medidas quantitativas da parte de complexidade das peças fundidas com base em critérios geométricos. Para a determinação do fator de complexidade as relações têm um valor entre 0 e 1, valores mais altos tem maior contribuição para a complexidade. Assim, a proporção de volume da peça C_{PR} é definida pela equação 1.

$$C_{PR} = 1 - \frac{V_p}{V_b} \quad (1)$$

A razão de área C_{AR} é definida pela equação 2.

$$C_{AR} = 1 - \frac{A_p}{A_s} \quad (2)$$

A relação entre o número de machos C_{NC} é definido pela equação 3.

$$C_{NC} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + N_C}} \quad (3)$$

A relação de volume dos machos C_{CR} é obtida pela equação 4.

$$C_{CR} = 1 - \frac{\sum V_{Ci}}{V_B} \quad (4)$$

A relação de espessura C_{TR} é fornecida pela equação 5.

$$C_{TR} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (5)$$

Assim a proporção de profundidade C_{DR} é definida pela equação 6.

$$C_{DR} = 1 - \frac{0,5 * (\min(L, H, W))}{D_d} \quad (6)$$

A partir das equações listadas acima podemos definir o fator de complexidade CF_{est} apresentado pela equação 7.

$$CF_{est} = 5,7 + 10,8C_{PR} + 18C_{AR} + 32,7C_{NC} + 29C_{CR} + 6,9C_{TR} + 0,7C_{DR} \quad (7)$$

Esta relação será usada como medida da complexidade de projeto de peça.

O custo da ferramenta é influenciado pelo design da ferramenta e pela complexidade da ferramenta, que é ditada pela complexidade do projeto da peça. Por exemplo, o molde para um projeto de peça complexa. Os fabricantes de ferramentas observaram que o custo da ferramenta depende do número de machos, volume e área superficial da peça, volume do macho, profundidade de estiramento (ou seja, a

profundidade do ferramental) e variação na espessura da seção. (ALMAGHARIZ *et al.*, 2016)

2.6 SOLIDIFICAÇÃO DIRECIONAL

O módulo de *Chvorinov* determina qual parte da peça irá solidificar por último, geralmente é utilizado para a definição do local onde será colocado o massa lote. A equação 8 apresenta o módulo de *Chvorinov*. (WLODAWER, 1966)

$$M_{ch} = \frac{V_p}{A_s} \quad (8)$$

Em que:

V_p É o volume da peça.

A_s É a área superficial.

2.7 CONCEPÇÃO DE FORMA

Seguir estas recomendações é fundamental para obter a melhor concepção de forma e evitar problemas e defeitos futuros. (CASTINGS; CENTRE, 1999)

1. Desenhe a forma do componente usando a espessura mínima da parede necessária para atingir os critérios de desempenho.
2. Desenhe a forma do componente usando mudanças de espessura graduais e progressivas.
3. Evite grandes seções isoladas.
4. Evite cantos vivos e ângulos reentrantes.
5. Projete junções para evitar concentração de massa.
6. Identificar as áreas críticas e especiais do componente.
7. Identificar as dimensões chave e tolerâncias necessárias para a função componente.
8. Identificar pontos de fixação e pontos distantes da linha de simetria.
9. Quantificar a qualidade e especificar o material de forma consistente com ótima economia e aptidão para o desempenho.
10. Estabelecer uma ligação com um especialista em fundição numa fase do processo de projeto.

3 METODOLOGIA

Segundo Jung (2009) este trabalho é de natureza aplicada pois tem a finalidade de gerar conhecimento para a otimização do modelamento de peças a serem fabricadas por Manufatura Aditiva, bem como a redução do tempo de fabricação. Com relação aos objetivos a presente pesquisa é classificada como exploratória, pois objetiva promover maior conhecimento dos critérios de fundibilidade aplicados à Manufatura Aditiva.

O presente trabalho faz uma abordagem quantitativa ao problema, na qual as informações e resultados, serão obtidos através do modelamento 3D da peça e simulações de impressão.

Do ponto de vista técnico podemos classificá-lo como experimental, pois selecionaremos critérios de fundibilidade que influenciam no projeto da peça, assim como o tempo necessário para fabricá-la.

A primeira etapa do trabalho compreende uma revisão de literatura a respeito de critérios associados ao conceito de fundibilidade. A segunda etapa consiste em modelar as peças em *software 3D* e realizar os cálculos de complexidade de forma para as peças selecionadas. Já na terceira etapa serão realizadas as simulações de impressão. Na quarta e última etapa será selecionada uma peça real de fundição

Na sequência são apresentados os fatores de forma adaptados a serem utilizados.

3.1 FATORES DE FORMA

Os fatores de forma foram adaptados de parcelas da equação do fator de complexidade. Os fatores de forma utilizados para avaliar a complexidade são: fator de forma em função da área, fator de forma em função do volume e fator de forma em relação ao cubo base.

3.1.1 Fator de forma em volume e área

Aqui serão aplicados dois fatores diferentes de forma diferentes, um em função da área superficial da peça em relação a área máxima de impressão e outro em função do volume da peça em relação ao volume máximo de impressão, ambos

apresentam o mesmo comportamento, quanto menor seu valor, mais complexa será a peça. Estas relações podem ser calculadas respectivamente pelas equações 9 e 10.

$$C_A = \frac{A_p}{A_{m\acute{a}x}(x, y, z)} \quad (9)$$

Em que:

A_p é a área superficial da peça

$A_{m\acute{a}x}$ é a máxima área superficial de impressão

$$C_v = \frac{V_p}{V_{m\acute{a}x}(x, y, z)} \quad (10)$$

Em que:

V_p é o volume do peça

$V_{m\acute{a}x}$ é o máximo volume de impressão

3.1.2 Fator de forma em complexidade

O fator de forma em complexidade transforma o volume da peça em um cubo base e relaciona a área superficial desse cubo a área superficial da peça. Quanto menor esta relação mais complexa será a peça. Esta relação é calculada pela equação 11.

$$C_{PX} = \frac{6 * (v_p)^{2/3}}{A_p} \quad (11)$$

Em que:

V_p é o volume da peça

A_p é a área superficial da peça

3.2 MODELAGEM 3D DE COMPONENTES

Esta etapa consiste em modelar as peças em *software 3D* e realizar os cálculos de complexidade de forma para as peças selecionadas, as quais foram: cubo, esfera, barra, placa, cilindro e disco.

Para o modelamento 3D dos componentes a serem simulados será utilizado o *SolidWorks 2015* respeitando as dimensões máximas de impressão.

3.3 SIMULAÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA

Foram realizadas simulações de impressão 3D no *software* de código aberto e *freeware Repetier-Host*. Onde os únicos parâmetros que foram modificados são mostrados na tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Parâmetros de simulação

Parâmetro	Variável Utilizada
Diâmetro de Filamento	1,75 [mm]
Espessura de camada	0,25 [mm]
Dimensão Máxima em “x”	140 [mm]
Dimensão Máxima em “y”	140 [mm]
Dimensão Máxima em “z”	140 [mm]
Padrão de Enchimento	Linhas
Densidade de Enchimento	20% e 100%

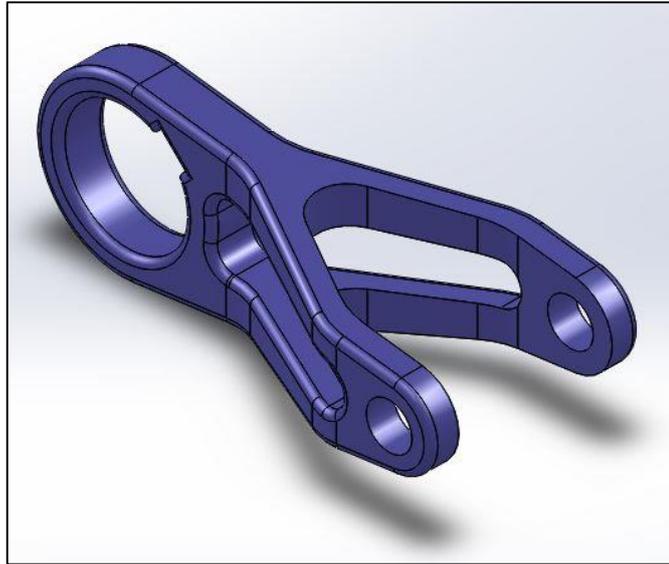
Fonte: Autoria própria (2017)

Serão realizadas as simulações de impressão para análise do tempo de fabricação para relacioná-lo com suas respectivas complexidades.

3.4 ESTUDO DE CASO

Selecionaremos uma peça real de fundição, conforme mostra a figura 4 abaixo, e então aplicaremos todas as etapas anteriores, porém para as simulações de impressão iremos variar a complexidade das peças e verificar o comportamento do tempo de impressão. Com isso será possível afirmar se a complexidade tem influência no tempo de impressão. Para o estudo de caso utilizaremos uma densidade de preenchimento de 100%, também respeitando as dimensões máximas de nossa impressora.

Figura 4 - Modelo do estudo de caso



Fonte: Autoria própria (2017)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS DA COMPLEXIDADE DE FORMA

Com base nas informações obtidas no manual da impressora a ser utilizada (anexos) ficou definido que as dimensões máximas para o desenvolvimento das peças a serem modeladas serão de 140 mm x 140 mm x 140 mm (L, W, H).

Sendo assim é possível definir o volume máximo de impressão e a área máxima de impressão, onde os valores podem ser verificados na tabela 3.

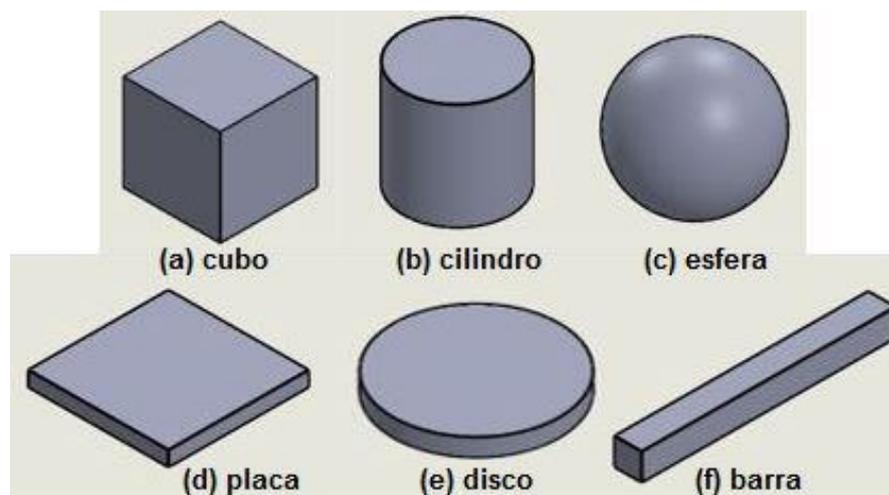
Tabela 3 - Volume e área de impressão

Volume máximo de impressão (cm ³)	Área máxima de impressão (cm ²)
2744,00	1176,00

Fonte: Autoria própria (2017)

As peças definidas a serem estudadas foram modeladas em *software* 3D (*SolidWorks 2015*) respeitando as dimensões máximas, simetria, quantificando a qualidade e especificando o material de forma consistente com ótima economia e aptidão para o desempenho conforme Wlodawer (1966). A figura 5 abaixo mostra a vista isométrica de cada peça modelada.

Figura 5 - Conjunto de peças modeladas



Fonte: Autoria própria (2017)

Já modelas as peças, as informações de volume e área de cada uma podem ser verificadas na tabela 4.

Tabela 4 - Volume e área de cada peça

Peça	Volume (cm ³)	Área Superficial (cm ²)
Cubo	2744,00	1176,00
Esfera	1436,76	615,75
Barra	31,50	88,50
Placa	294,00	476,00
Cilindro	2155,13	923,63
Disco	230,91	373,85

Fonte: Autoria própria (2017)

Com as informações da tabela 3 e 4 e utilizando as equações 9, 10 e 11, podemos encontrar os valores de complexidade em relação a área, volume e fator de complexidade de forma, onde os mesmos se encontram na tabela 5.

Tabela 5 - Resultados de complexidade

Peça	Fator de forma em volume	Fator de forma em área	Fator de forma em complexidade
Cubo	1,0000	1,0000	1,0000
Esfera	0,5236	0,5236	1,2407
Barra	0,0115	0,0753	0,6762
Placa	0,1071	0,4048	0,5573
Cilindro	0,7854	0,7854	1,0839
Disco	0,0841	0,3179	0,6041

Fonte: Autoria própria (2017)

Para o fator de forma em função do volume e fator de forma em função da área a peça que se apresentou mais complexa foi a barra, para o fator de forma em complexidade a mais complexa é a placa.

4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE MANUFATURA ADITIVA

Tendo as complexidades calculadas, utilizaremos o *software* de código aberto *Repetier-Host*, onde é possível importar um ou mais modelos 3D, mudar a escala, girar ou duplicar a peça em sua cama virtual. Também integra o *software* três suportes de fatiamento, que são essenciais para a manufatura aditiva, estes fatiam a peça, definem a espessura de camada e a densidade de preenchimento. Além disso os suportes de fatiamento dão a versão final da peça, onde pode-se ver todos os movimentos da extrusora e estruturas de apoio, determinadas áreas ou camadas

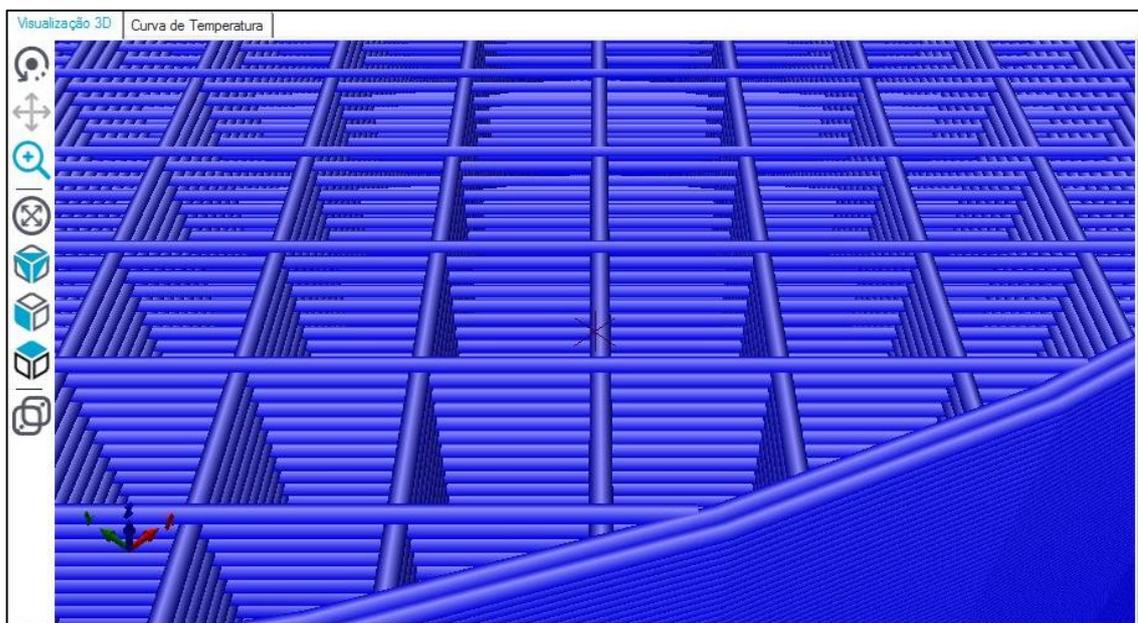
individuais e reconhecer potenciais problemas de impressão. (HOT-WORLD GMBH & CO. KG, 2017)

Repetier-Host funciona com as impressoras mais populares do mundo que utilizam a tecnologia FDM, nele é possível variar todos os parâmetros de impressão, desde a temperatura de extrusão, velocidade da extrusora, espessura de entrada e saída do filamento e até mesmo a temperatura da mesa para as impressoras que oferecem esta possibilidade.

Para não haver problemas ou diferenças nas simulações, foi selecionado no *Repetier-Host* os parâmetros semelhantes aos da impressora disponível na Universidade, que é uma *Cubify Cube 3D Printer 2nd*, com uma espessura de camada de 0,25 mm conforme seu manual informa e uma densidade de preenchimento de 20%.

Com os parâmetros definidos, foram iniciadas as simulações, onde o próprio *software* emite um relatório com as estatísticas de impressão, a figura 6 mostra o padrão de preenchimento utilizado, que foi o de retas paralelas, e também demonstra como podemos observar camada a camada da peça.

Figura 6 - Simulação de fabricação do cilindro

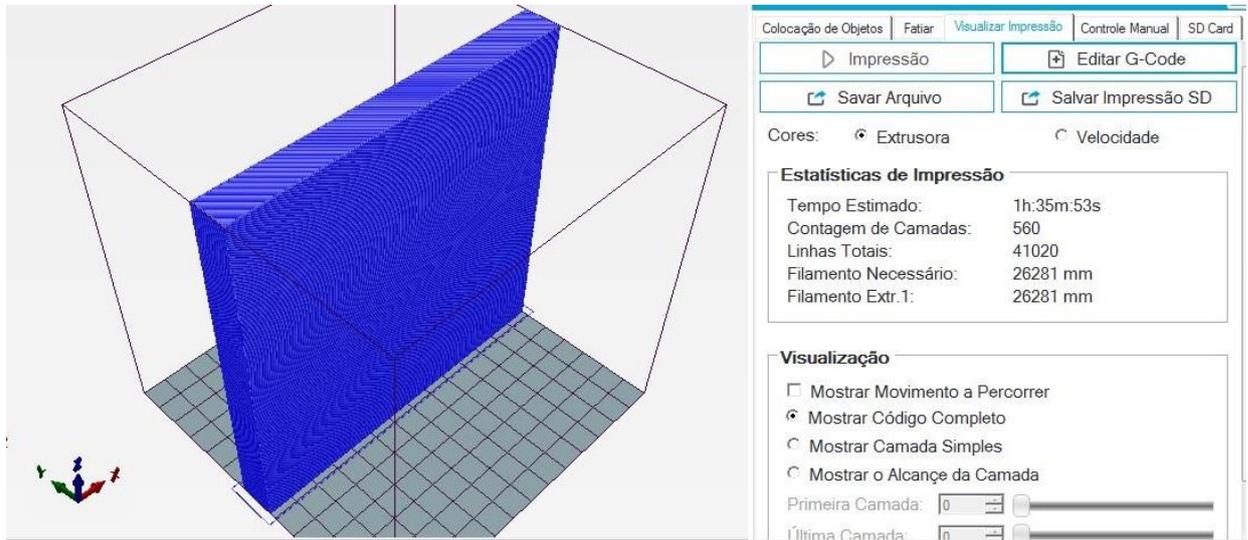


Fonte: Autoria própria (2017)

As peças foram dispostas na mesa de impressão de maneira que a extrusora percorra a menor distância no eixo Z, pois a posição em que ela será impressa tem influência direta no tempo de impressão. É possível observar a variação

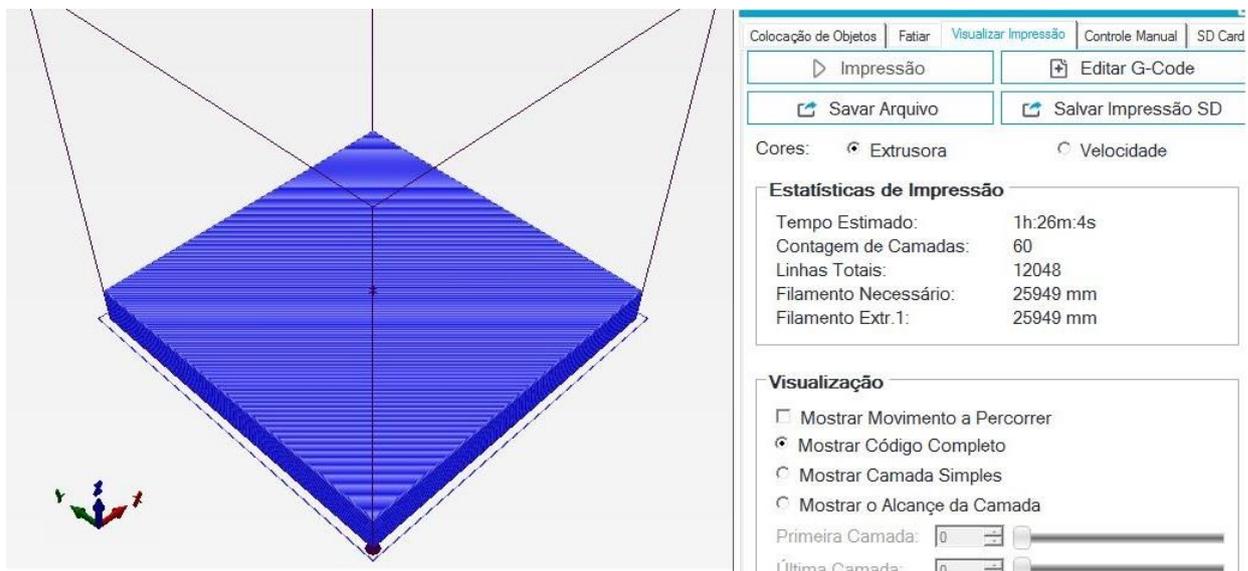
de tempo para uma mesma peça em função de como ela é posicionada na mesa de impressão. A escolha de menor distância a ser percorrida tem como base as figuras 7 e 8 abaixo.

Figura 7 - Maior distância percorrida no eixo z.



Fonte: Autoria própria (2017)

Figura 8 - Menor distância percorrida no eixo z.



Fonte: Autoria própria (2017)

Com a mudança de posição foi possível observar uma redução no tempo de impressão de cerca de 10%, isso para este caso, podendo haver maior diferença de tempo para outras peças, mas sempre reduzindo quando se escolhe uma menor

distância a ser percorrida pela extrusora no eixo Z, isso devido ao fato de o *software* criar estruturas auxiliares de equilíbrio na base na peça.

Com isso optaremos pela posição de melhor desempenho para o restante das simulações.

Realizadas todas as simulações a tabela 6 mostra as estatísticas de impressão de todas as peças, nela é possível observar o tempo estimado de impressão e o comprimento de filamento necessário.

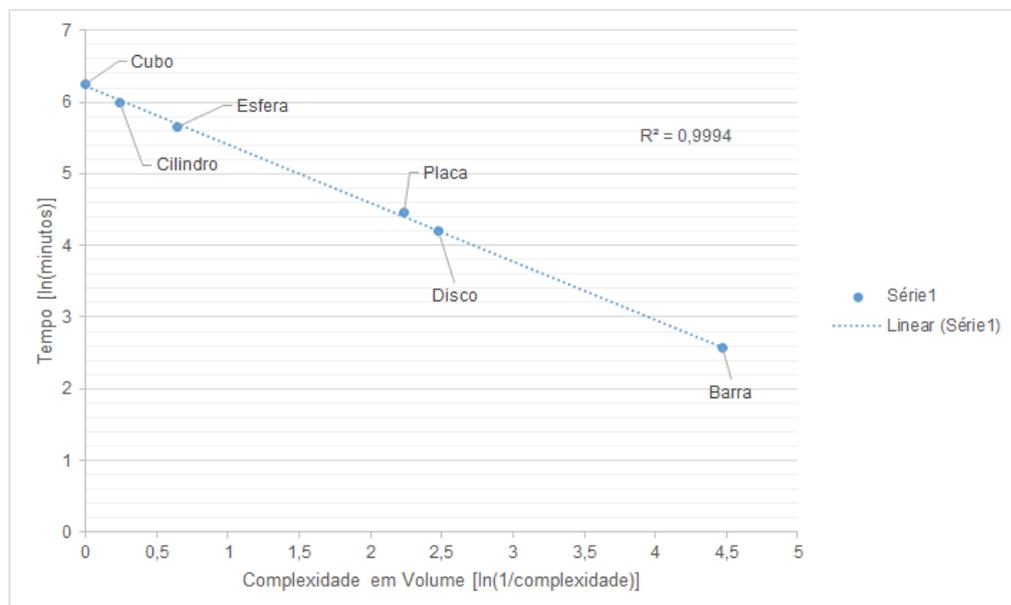
Tabela 6 - Estatísticas de impressão

Objeto	Tempo Estimado (minutos)	Filamento Necessário (cm)
Cubo	518	14879,5
Esfera	287	8141,9
Barra	13	381,0
Placa	86	2628,1
Cilindro	403	11658,4
Disco	67	2097,7

Fonte: Autoria própria (2017)

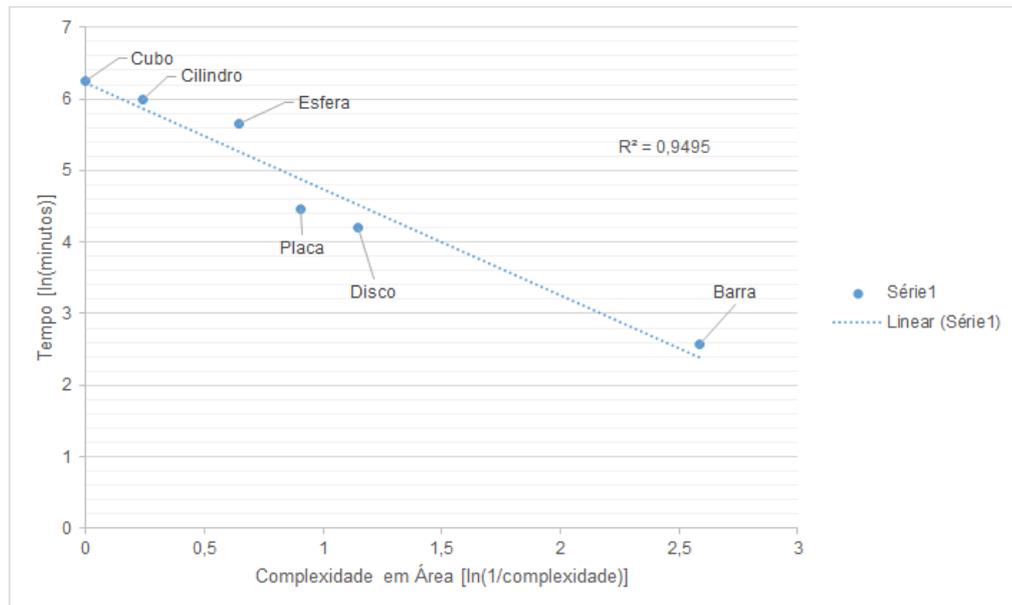
Com as informações das tabelas 5 e 6 é possível relacionar as respectivas complexidades ao tempo estimado de impressão conforme mostra as figuras 9, 10 e 11.

Figura 9 - Tempo em função da complexidade em volume



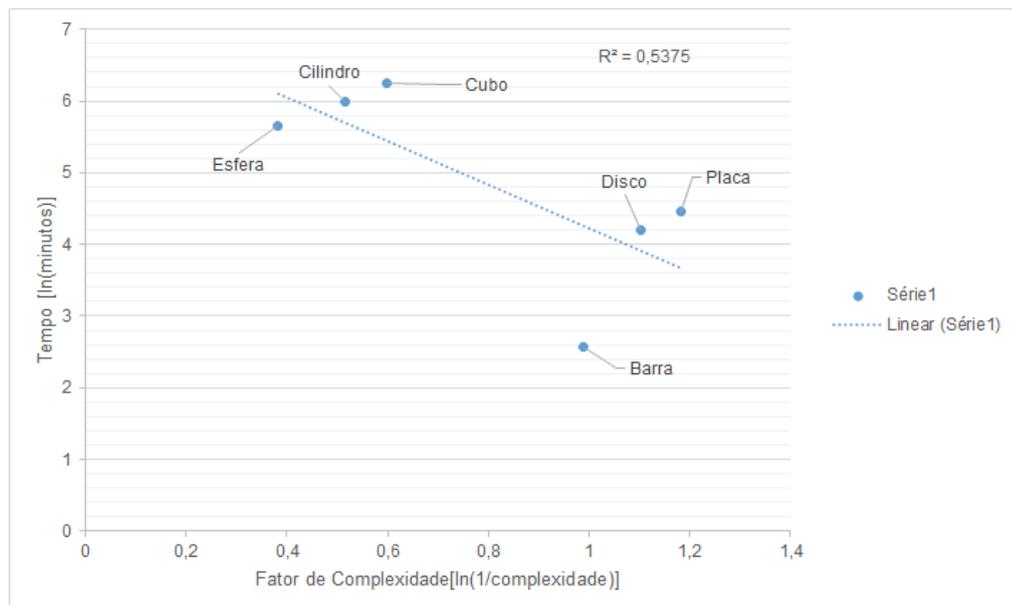
Fonte: Autoria própria (2017)

Figura 10 - Tempo em função da complexidade em área



Fonte: Autoria própria (2017)

Figura 11 - Tempo em função do fator de complexidade



Fonte: Autoria própria (2017)

Observando cada R quadrado dos gráficos acima, pode-se afirmar que a complexidade que melhor define o comportamento do tempo é a complexidade em volume.

Definida a curva que melhor demonstra o comportamento do tempo em função da complexidade, iremos relaciona-la com o custo de filamento de cada

material utilizado na impressora em estudo, os materiais são polímeros de ABS e de PLA.

Segundo informações da própria fabricante da impressora, o custo por grama de filamento, tanto para ABS e PLA, é de R\$0,49, lembrando que a impressora *Cubify Cube 3D Printer 2nd* só aceita cartuchos de filamento originais fornecidos pela fabricante da mesma. (3D systems, 2017)

Visto que a empresa fornecedora dos cartuchos de filamento não fornece o comprimento contido em seu interior, serão utilizadas as densidades dos polímeros e o comprimento necessário de filamento para calcularmos as massas de cada peça simulada. Isso porque as peças não são 100% maciças, devido a densidade de preenchimento, não podendo utilizar o volume da peça. Para o cálculo da massa será utilizada a relação de volume do cilindro multiplicado pela densidade de cada material. O diâmetro do filamento utilizado é de 1,75 mm e comprimento utilizado será o estimado para cada peça, as densidades são demonstradas conforme tabela 7 abaixo.

Tabela 7 - Densidade dos materiais utilizados

Material	ABS	PLA
Densidade (g/cm ³)	1,03	1,24

Fonte: Adaptado (3D SYSTEMS, 2017)

Com isso é possível calcularmos a massa e o custo de filamento para cada peça simulada. Onde os valores podem ser verificados na tabela 8 abaixo.

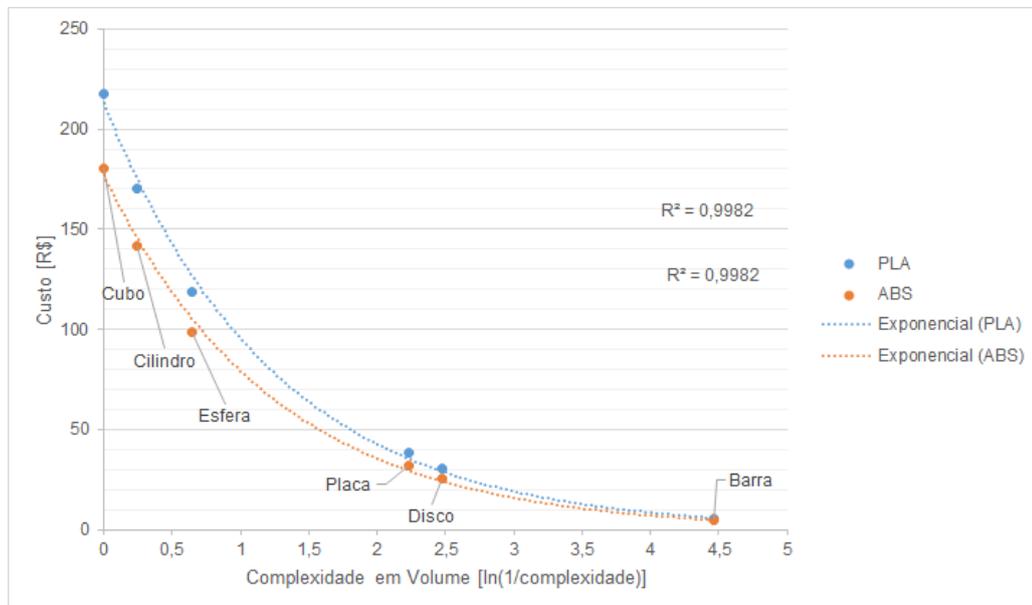
Tabela 8 - Massa e custo de cada peça

Peça	Massa de PLA (g)	Massa de ABS (g)	Custo PLA (R\$)	Custo ABS (R\$)
Cubo	443,79	368,63	217,45	180,62
Cilindro	347,72	288,83	170,38	141,52
Esfera	242,84	201,71	118,99	98,83
Placa	78,38	65,11	38,40	31,90
Disco	62,56	51,97	30,65	25,46
Barra	11,36	9,44	5,56	4,62

Fonte: Autoria própria (2017)

Então a complexidade é relacionada com o custo, conforme mostra a figura 12.

Figura 12 - Custo em função da complexidade

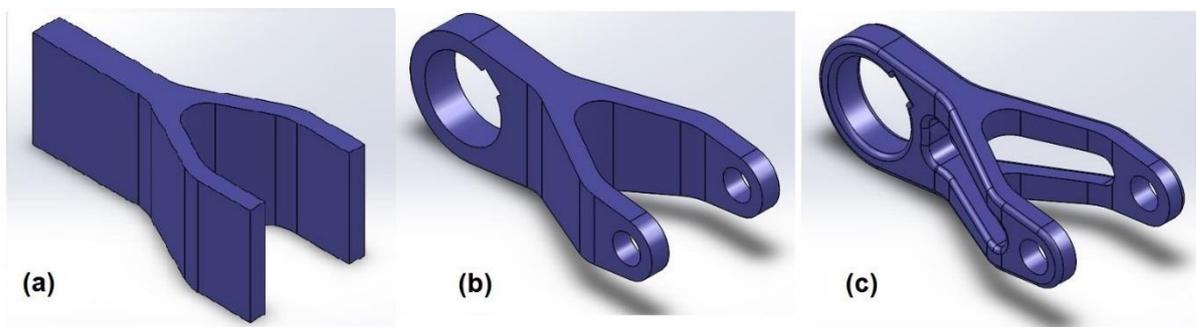


Fonte: Autoria própria (2017)

4.3 ESTUDO DE CASO

Tendo em vista que para cada complexidade tivemos uma peça diferente, iremos realizar a mesma análise do tempo em função da complexidade para uma mesma peça, variando a sua complexidade, conforme mostra a figura 13.

Figura 13 - Variação de complexidade para uma mesma peça



Fonte: Autoria própria (2017)

Os valores de seus respectivos volumes e suas respectivas áreas podem ser verificados na tabela 9 abaixo.

Tabela 9 - Volume e área em função da complexidade

Peça	Volume (cm ³)	Área Superficial (cm ²)
(a)	108,90	271,78
(b)	61,15	191,17
(c)	43,99	169,05

Fonte: Autoria própria (2017)

Com as informações das tabelas 3 e 9, novamente com as equações 9, 10 e 11 calculamos suas complexidades em função de área, volume e fator de complexidade, como mostra a tabela 10 abaixo.

Tabela 10 - Resultados de complexidade para uma única peça

Peça	Complexidade em função do volume	Complexidade em função da área	Fator de complexidade
(a)	0,2311	0,0397	0,5035
(b)	0,1626	0,0223	0,4872
(c)	0,1438	0,0160	0,4423

Fonte: Autoria própria (2017)

Feitas as simulações de impressões nos mesmo parâmetros das já realizadas, as tabelas 11 e 12 abaixo mostram os tempos de impressão, visto que com 100% de preenchimento, o tempo de impressão se apresentou menor, devido a este fato a complexidade será comparada com o tempo de impressão para 100% de preenchimento.

Tabela 11 – Estatísticas de impressão em função da variação da complexidade com 100% de preenchimento

Peça	Tempo (minutos)	Filamento necessário (cm)
(a)	136	4593,6
(b)	80	2581,0
(c)	60	1855,4

Fonte: Autoria própria (2017)

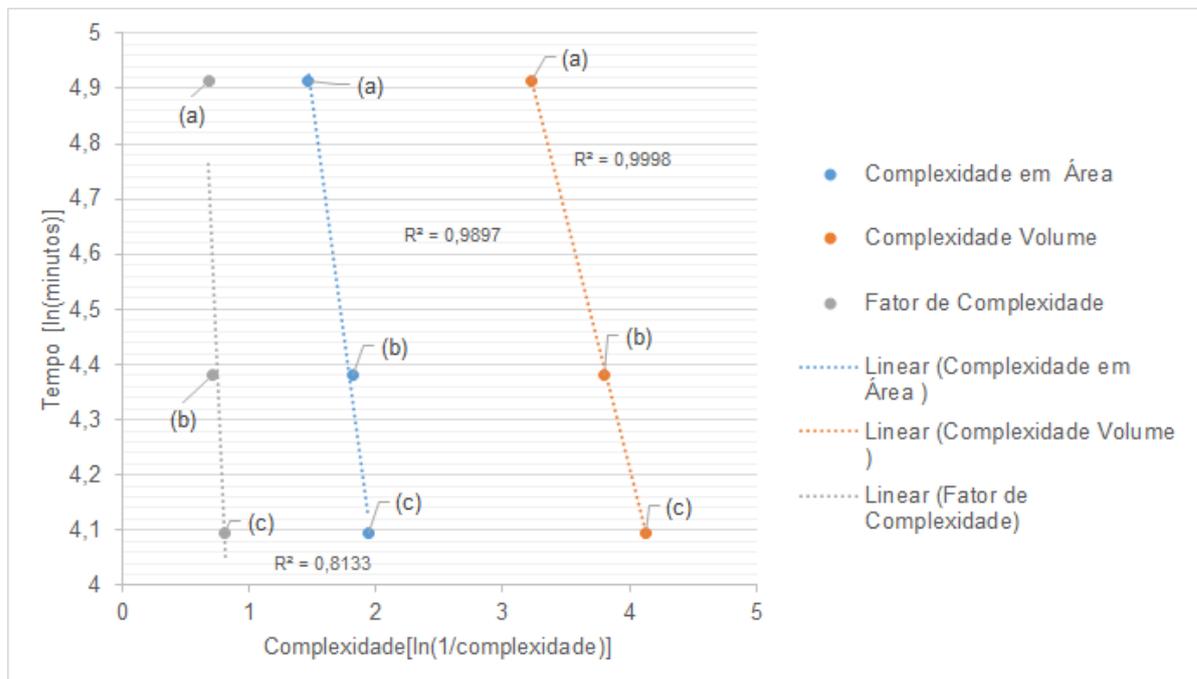
Tabela 12 - Estatísticas de impressão em função da variação da complexidade com 20% de preenchimento

Peça	Tempo (minutos)	Filamento necessário (cm)
(a)	156	5381,95
(b)	88	2839,10
(c)	63	1948,17

Fonte: Autoria própria (2017)

Com os dados das tabelas 10 e 11 é possível traçar o gráfico do tempo em função da complexidade, conforme mostra a figura 14, para uma densidade de preenchimento de 100%.

Figura 14 - Gráfico do tempo em função da complexidade



Fonte: Autoria própria (2017)

Novamente, com os dados da tabela 7 e 11, e utilizando a mesma relação anteriormente definida, calculamos as massas e o custo para cada peça conforme mostra a tabela 13 abaixo.

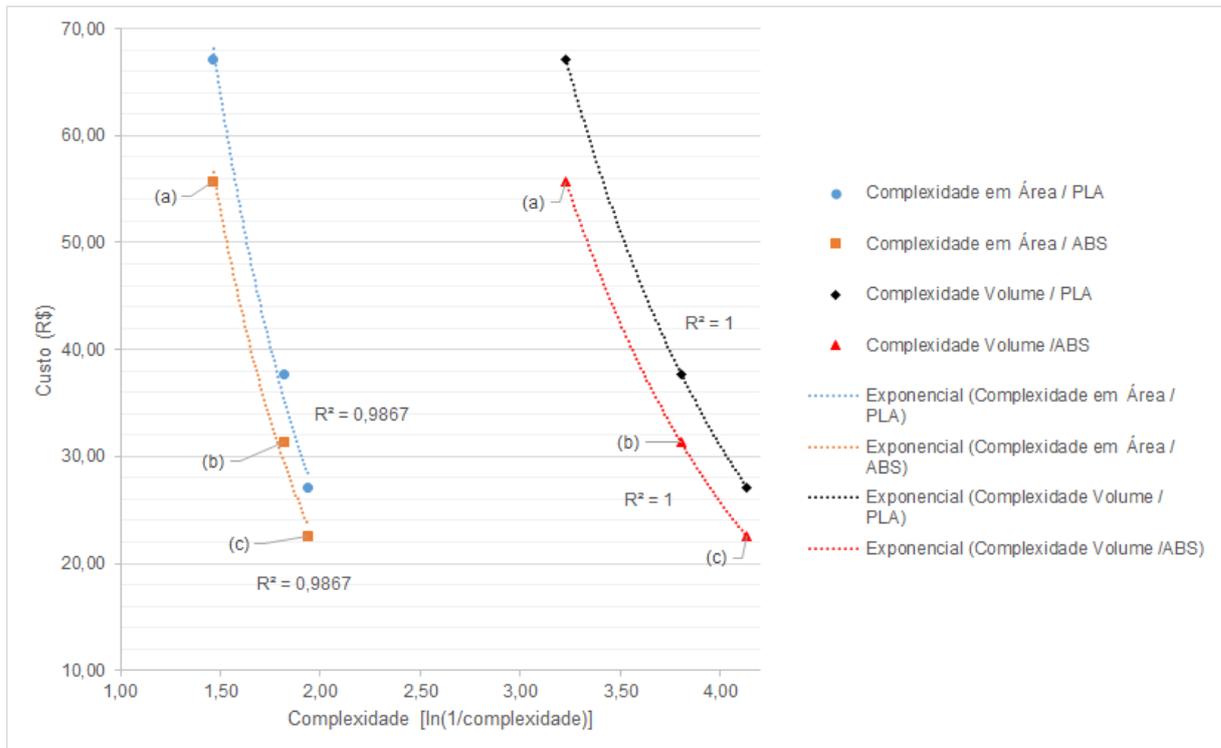
Tabela 13 - Massa e custo para a mesma peça

Peça	Massa de PLA (g)	Massa de ABS (g)	Custo PLA (R\$)	Custo ABS (R\$)
(a)	137,01	113,80	67,13	55,76
(b)	76,98	63,94	37,72	31,33
(c)	55,34	45,97	27,12	22,53

Fonte: Autoria própria (2017)

Ao compararmos o custo em relação as complexidades, é possível observar na figura 15 abaixo, que quanto maior a complexidade menor será o custo.

Figura 15 - Custo em função da complexidade



Fonte: Autoria própria (2017)

É importante ressaltar que para esta última simulação foi utilizada uma densidade de preenchimento de 100%, isto porque ao utilizar baixa densidade como nas simulações anteriores o tempo de impressão aumentou junto com a complexidade, devido ao fato de ao utilizar baixa densidade o próprio software da impressora cria estruturas auxiliares de sustentação e reforço para partes ocas e vãos livres, não sendo necessário esta correção para altas densidades.

Com isso é possível avaliar que a complexidade tem relação direta com o tempo de fabricação por FDM. A posição em que a peça será impressa também afeta o tempo de impressão, assim como a densidade de preenchimento, sendo essa a maior responsável por afetar o tempo de impressão, em peças sólidas, quanto maior a densidade maior o tempo, porém para peças muito complexas ou com muitos vãos livres, fica recomendado uma densidade maior de preenchimento, onde constatou-se

que em peças pouco complexas ou sólidas uma alta densidade de preenchimento aumento muito o tempo de impressão.

5 CONCLUSÃO

Com o presente estudo foi possível verificar que os critérios complexidade são adequados na modelagem de componentes a serem fabricados por Manufatura Aditiva, pois a partir destes critérios podemos otimizar o *design* da peça, através dos dados obtidos no modelamento 3D e melhorar o tempo de fabricação por FDM.

Algumas características da fabricação por FDM puderam ser observadas, tais como: orientação da peça na mesa de impressão, menor dimensão de impressão no eixo “z”, densidade de preenchimento e valores de complexidade. Onde todas as características acima citadas apresentam influência direta no tempo de fabricação por Manufatura Aditiva, sendo a complexidade a que define melhor o tempo de impressão.

Outro ponto importante de ressaltar é que os valores de complexidade podem ser obtidos antes da fabricação de um protótipo, isso ainda no modelamento 3D da peça, podendo realizar alterações no *design* a fim de otimizar a produção, somente com alterações de volume e área superficial, dados esses facilmente obtidos no *software* de modelamento.

Tanto na simulação quanto na impressão os softwares fornecem o tempo estimado de fabricação, sendo assim, não necessário acompanhar a totalidade da impressão com o intuito de mensurar o tempo.

Ao compararmos os diferentes resultados de complexidade com o tempo de impressão foi possível definir qual complexidade representa melhor a curva de tempo, sendo esta a complexidade em volume onde obtivemos os melhores resultados com pouca variação, como mostra cada R quadrado das curvas analisadas, onde também foi possível relacionar esta mesma curva de complexidade com o custo, e ambas apresentam o mesmo comportamento, quanto maior a complexidade menor serão seus valores.

Vale lembrar que as tecnologias de manufatura aditiva estão em amplo crescimento, sendo esta versão de impressora analisada uma das com menores volumes de impressão, portanto para estudos futuros é possível analisar outras tecnologias de impressão, como a impressão em metal.

Sendo assim os objetivos deste trabalho de conclusão de curso foram atingidos, onde foi possível relacionar diretamente a complexidade de peças com o tempo e custo de impressão.

REFERÊNCIAS

- ALMAGHARIZ, E. S. et al. Quantifying the role of part design complexity in using 3d sand printing for molds and cores. **International Journal of Metalcasting**, v. 10, n. 3, p. 240–252, 2016.
- CASTINGS, T.; CENTRE, D. BROADSHEET 347-1 The Ten Commandments for good casting design. 1999.
- CHOI, S. H.; CHEUNG, H. H. A versatile virtual prototyping system for rapid product development. **Computers in Industry**, v. 59, n. 5, p. 477–488, 2008.
- GARDAN, N.; SCHNEIDER, A. Topological optimization of internal patterns and support in additive manufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 37, p. 417–425, 2015.
- HOT-WORLD GMBH & CO. KG. **Repetier-Host**. Disponível em: <<https://www.repetier.com/>>. Acesso em: 20 set. 2017.
- KRUTH, J.-P.; LEU, M. C.; NAKAGAWA, T. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 47, n. 2, p. 525–540, 1998.
- LAMPMAN, S. Casting Design and Performance. **ASM International**, p. 165, 2009.
- LEE, J.-Y.; AN, J.; CHUA, C. K. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. **Applied Materials Today**, v. 7, p. 120–133, 2017.
- LI, Q.; KUCUKKOC, I.; ZHANG, D. Z. Production Planning in Additive Manufacturing and 3D Printing. **Computers & Operations Research**, v. 83, p. 157–172, 2017.
- MAHINDRU, V.; MAHENDRU, P. Review of Rapid Prototyping-Technology for the Future. **Global Journal of Computer Science and Technology**, v. 13, n. 4, p. 26–38, 2013.
- MODEEN, T. CADCAMing: The use of rapid prototyping for the conceptualization and fabrication of architecture. **Automation in Construction**, v. 14, n. 2 SPEC. ISS., p. 215–224, 2005.
- MONTERO, M.; ROUNDY, S.; ODELL, D. Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments. **Proceedings of Rapid Prototyping & Manufacturing Conference**, p. 1–21, 2001.

RAVI, B. Design for Casting. **Meitbacin**, 1999.

RAVI, B. Metal Casting_ Computer-Aided Design and Analysis - B. In: New Delhi: Prentice-Hall of India, 2005. p. 110–120.

RESINEX. **ABS**. Disponível em: <<http://www.resinex.pt/tipos-de-polimeros/abs.html>>. Acesso em: 26 abr. 2017a.

RESINEX. **PLA**. Disponível em: <<http://www.resinex.pt/tipos-de-polimeros/pla.html>>. Acesso em: 26 abr. 2017b.

STRATASYS. **Prototipagem Rápida**. Disponível em: <<http://www.stratasys.com/br/resources/rapid-prototyping>>. Acesso em: 10 abr. 2017a.

STRATASYS. **Fused Deposition Modeling**. Disponível em: <<http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology>>. Acesso em: 24 abr. 2017b.

WLODAWER, R. Directional Solidification of Steel Castings. **Directional Solidification of Steel Castings**, p. 233–240, 1966.

ANEXO A – PARTE DO MANUAL DA IMPRESSORA UTILIZADO

The Print Jet print tip heats the material and produces a thin flowing material of plastic creating layers that adhere to the Print Pad. After each layer is produced, the Print Pad lowers so that a new layer can be drawn on top of the last. This process continues until the last layer on the top of the creation is jetted.

CUBE 3D PRINTER FEATURES

- Material Cartridge
- Durable, ABS & PLA Plastic
- 25 free 3D print creations
- USB & WI-FI connectivity

CUBE 3D PRINTER PROPERTIES

Technology: Plastic Jet Printing (PJP)

Print Jets: Single jet

Max. Creation Size: 5.5" x 5.5" x 5.5" (140 x 140 x 140 mm)

Material: Tough recyclable plastic

Layer Thickness: 10 mil | 0.01 inches 250 microns | 0.25 mm

Supports: Fully automated; easy to peel off

Cartridge: 1 Cartridge prints 13 to 14 mid-sized

