

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**MANUFATURA ADITIVA COMO PRINCÍPIO DE
SOLUÇÃO PARA INDUSTRIALIZAÇÃO DA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Lorena Tameirão de Moura Corrêa

Brasília, Julho de 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

MANUFATURA ADITIVA COMO PRINCÍPIO DE SOLUÇÃO PARA INDUSTRIALIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Lorena Tameirão de Moura Corrêa

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheira Eletricista.

Banca Examinadora

Prof. Andrea C. Santos, EPR/UnB (Orientador)

Prof. José Edil G. de Medeiros, ENE/UnB

Eng. Fabio Pires, SENAI

Brasília, Julho de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

LORENA, TAMEIRÃO DE MOURA CORREA
Manufatura aditiva como princípio de solução para industrialização da construção civil

[Distrito Federal] 2016.

x, 94p., 297 mm (FT/UnB, Engenharia, Engenharia Elétrica, 2016). Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1. Impressão 3D para concreto
3. Desenvolvimento de produto

2. Estrutura funcional
4. industrialização da construção

I. ELÉTRICA/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CORRÊA, L T M, (2016). Manufatura aditiva como princípio de solução para industrialização da construção civil. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 94p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Lorena Tameirão de Moura Corrêa.

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Manufatura aditiva como princípio de solução para industrialização da construção civil.

GRAU: Engenharia

ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Lorena Tameirão de Moura Corrêa
SQN 212 Bloco B ap 405 – Asa Norte.
70864-020 Brasília – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

A caminhada foi longa, quase sete anos entre CEFET e UNB, e nada teria sido possível sem o apoio da minha mãe, meu maior exemplo de superação e determinação. Foi ela quem investiu na minha educação sem medir esforços, independentemente de qualquer dificuldade.

Agradeço ao meu marido, amigo e companheiro de muitas aventuras. Também Engenheiro Eletricista, por muitas vezes não me deixou desistir do curso, perante as dificuldades, notas baixas e disciplinas complexas. Sempre dizia: “vai valer a pena”.

Agradeço também a todos professores que tive o prazer de conhecer ao longo destes anos, por todas as oportunidades que me foram concedidas e que tanto contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

Em especial, agradeço à professora Andréa, minha orientadora. Pouco me conhecendo, confiou em meu potencial e foi a grande incentivadora para a elaboração deste trabalho.

Lorena Tameirão de Moura Corrêa.

RESUMO

A mudança de paradigmas tecnológicos dos processos construtivos é o objeto de estudo deste trabalho, motivado pela hipótese de redução do déficit habitacional e moradias inapropriadas como resultado da industrialização do setor da construção. A utilização de tecnologia e automação é fundamental para aumentar a produção, reduzir o trabalho manual e melhorar a qualidade dos sistemas construtivos. A manufatura aditiva (MA) aplicada à construção civil surge como um princípio de solução para automatização da construção civil, que enfrenta problemas de baixa produtividade e dependência de mão de obra pouco especializada devido a predominância de trabalho manual e intensivo em seus métodos construtivos. O *Contour Crafting*, técnica híbrida de FDM (do inglês, *Fused Deposition Modeling*), permite aplicar os princípios da MA aos processos construtivos. Este projeto visa auxiliar o processo de desenvolvimento de produto da startup InovaHouse3D, modelando a estrutura funcional e apresentando alternativas de concepção de uma máquina de impressão 3D para concreto compatível para uso na construção civil associado a uma visão sistêmica dos processos e operações da máquina.

Palavras Chave: impressão 3D para concreto, estrutura funcional, desenvolvimento de produto, industrialização da construção

ABSTRACT

The central topic of this work is based on new technological paradigms for construction aiming to reduce the rate of homeless people or with an inappropriate house. By using automation and technologies it is possible to reduce manual labor, to improve production and quality. The additive manufacturing (AM) is a principle-solution for automation of the construction process, which is facing low productivity and manual labor dependency issues. Based on the FDM (fused deposition modeling) hybrid technique, Contour Crafting, it is possible to develop and apply the AM principles into construction processes. This project is associated with the development of InovaHouse3D prototype design, which will present the functional structure and alternatives conceptions for a 3D concrete printer compatible with its use on construction. A systemic view of the whole machine's process and operation is also developed.

Keywords: 3D concrete printer; functional structure; product design; construction

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	11
1.1 CENÁRIO E MOTIVAÇÃO DO PROJETO	12
1.2 OBJETIVOS	13
1.3 METODOLOGIA	13
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	13
CAPÍTULO 2 - A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL	15
2.1 ASPECTOS GERAIS	15
2.2 INDUSTRIALIZAÇÃO DO SETOR CONSTRUTIVO SEGUNDO WARSZAWSKI (1999)...	16
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	19
CAPÍTULO 3 - MANUFATURA ADITIVA	20
3.1 ASPECTOS GERAIS	20
3.1.1 Tipos de processos.....	21
3.2 PROJETO REPRAP	22
3.3 TÉCNICA HÍBRIDA DE FDM	24
3.4 DO POLÍMERO AO CONCRETO	25
3.4.1 Sistemas de impressão 3D para concreto	26
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
CAPÍTULO 4 - DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO	30
4.1 IMPORTÂNCIA DAS FASES INICIAIS DE PLANEJAMENTO.....	30
4.2 ABORDAGENS DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO	32
4.2.1 Desenvolvimento Integrado de Produtos segundo Back, <i>et al.</i> (2008)	32
4.2.2 Desenvolvimento de Produtos e Técnicas para Engenharia Reversa segundo Otto & Wood (2001)	33
4.2.3 Desenvolvimento de Sistemas Mecatrônicos segundo Hehenberger (2014)	35
4.3 TÉCNICAS E FERRAMENTAS	38
4.3.1 Conversão de necessidade em requisito de cliente	38
4.3.2 Métodos de criatividade	39
4.3.3 Síntese funcional e engenharia reversa	41
4.3.4 Matriz morfológica	43
4.3.5 Matriz Indicadora de Módulos (MIM)	43
4.3.6 IDEF0	44
4.3.7 Estudo de protótipo.....	45
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
CAPÍTULO 5 - ESTRUTURA FUNCIONAL	47
5.1 DESDOBRAMENTO FUNCIONAL	47
5.2 IDEF0	52
5.2.1 Projeto das paredes CAD	54
5.2.2 Planejamento dos Processos – CAPP	56
5.2.3 Operação – CAM	58
5.3 MATRIZ MORFOLÓGICA.....	61
5.4 MODULARIDADE DA MÁQUINA	64
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
CAPÍTULO 6 - O DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	68
6.1 PLANEJAMENTO DO PROTÓTIPO	68
6.2 CONSTRUÇÃO DA PROVA DE CONCEITO	69
6.3 ESTRUTURA PROPOSTA	71
6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES	75
7.1 ANÁLISE DOS OBJETIVOS E RESULTADOS	75
7.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
ANEXOS	79
Anexo 1 – Requisitos de clientes e especificações meta - PSP6.....	80
Anexo 2 – Visita técnica à TECRON Pré-moldados	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação causa efeito para os métodos construtivos ineficientes (Fonte: Autora) .	16
Figura 2 – Processo típico de produção de elementos de parede pré-fabricados (Fonte: Warsawski, 1999).....	18
Figura 3 – Estrutura da RepRap (Fonte: RepRapwiki, 2016).....	23
Figura 4 – Comparação qualitativa entre os processos de PR e CC (Fonte: Kwon, 2002) ...	25
Figura 5 – Modelagem computacional para modelagem física (Fonte: Lieyun, 2014).....	26
Figura 6 – Impressão de um edifício utilizando-se a técnica CC (Fonte: Contour Crafting, 2016).....	27
Figura 7 – Impressão de um hotel por TotalKustom (Fonte: Rudenko, 2016).....	28
Figura 8 – Braço robótico acoplado bico extrusor (Fonte: Anell, 2015).....	28
Figura 9 - Comprometimento do custo ao longo do ciclo de vida do produto. (Fonte: Downey, 1969).....	30
Figura 10 - Efeito escala (Fonte: Rozenfeld 2006).....	31
Figura 11 - Influência sobre o custo total do produto (Fonte: Smith e Reinertsen, 1991).....	31
Figura 12 – Macro fases do PRODIP (Fonte: baseado em Back et al, 2008)	32
Figura 13 – Representação gráfica do modelo PRODIP (Romano, 2003)	33
Figura 14 – Modelo de aprendizagem de Kolb (Fonte: Adaptado de Otto e Wood, 2001) ...	35
Figura 15 – Integração no projeto de produto mecatrônico (Fonte: Hehenberger et al, 2010)	36
Figura 16 – Módulo mecatrônico (Fonte: Hehenberger, et al, 2010).....	37
Figura 17 – Casa da qualidade (Fonte: Rozenfeld 2006).....	38
Figura 18 – Especificações-meta e as etapas do PDP (Fonte: autora).....	39
Figura 19 – Processo de criação (Fonte: adaptado de Back et al, 2008).....	39
Figura 20 - Formulação da função global do sistema (Fonte: Back et al, 2008).....	42
Figura 21 - Desdobramento da função global em funções parciais e elementares (Fonte: Back et al, 2008).	42
Figura 22 - Matriz Morfológica e a combinação de princípios de solução (Fonte: Rozenfeld, et al. 2006)	43
Figura 23 - Exemplo esquemático da aplicação da MIM. (Fonte: Rozenfeld, et al., 2006)....	44
Figura 24 – Representação das atividades e ICOMs na modelagem IDEF0 (Fonte: Desconhecido)	44
Figura 25 - Função global proposta para o sistema de impressão 3D para concreto (Fonte: autora).....	47
Figura 26 - Funções parciais alternativa 1 (Fonte: autora).....	48
Figura 27 - Funções elementares da alternativa 1 (Fonte: autora)	49

Figura 28 - funções parciais alternativa 2 (Fonte: autora).....	50
Figura 29 - Funções parciais alternativa 3 (Fonte: autora).....	51
Figura 30 - Nível global do Sistema de Impressão 3D de placas de concreto- A0 (Fonte: autora).....	52
Figura 31 – Desdobramento do sistema global nos níveis A1, A2 e A3 (Fonte: autora).....	54
Figura 32 - Nível A2 da atividade A1: Projeto da Paredes – CAD (Fonte: autora)	55
Figura 33 – Nível A3 da atividade A11: Criação de Modelo Arquitetônico (Fonte: autora)....	55
Figura 34 – Reconhecimento de features (Fonte: autora).....	56
Figura 35 - Nível A2 da atividade A2: Planejamento dos Processos (Fonte: autora)	56
Figura 36 - Nível A3 da atividade A21: Caracterização das Features (Fonte: autora).....	57
Figura 37 - Nível A3 da atividade A22: Definição das Operações (Fonte: autora)	57
Figura 38 - Nível A3 da atividade A23: Otimização (Fonte: autora)	58
Figura 39 - Nível A2 da atividade A3: Operação (Fonte: autora)	58
Figura 40 – Nível A3 da atividade A31: Preparação dos Insumos (Fonte: autora).....	59
Figura 41 - Nível A3 da atividade A32: Preparação da Máquina (Fonte: autora)	60
Figura 42 - Nível A3 da atividade A33: Execução (Fonte: autora)	60
Figura 43 – Matriz Morfológica (Fonte: autora).....	62
Figura 44 - Esboço da solução 1 (Fonte: SpiderBot)	63
Figura 45 - Esboço da solução 2 (Fonte: Apis).....	63
Figura 46- Esboço da solução 3 (Fonte: FarmBot).	64
Figura 47 – Matriz indicadora de módulos (Fonte: Autora)	65
Figura 48 – Concepções alternativas para o módulo extrusor (Fonte: autora).....	66
Figura 49 – Equipe montando a RepRap (Fonte: autora).....	68
Figura 50 – Impressora montada e calibrada (Fonte: autora).....	69
Figura 51 – Bico extrusor construído pela equipe da InovaHouse3D (Fonte: autora)	70
Figura 52 – Detalhes do carrinho do protótipo (Fonte: autora).....	70
Figura 53 – estrutura final do protótipo (Fonte: autora).....	71
Figura 54 – proposta de estrutura para o protótipo alpha (Fonte: autora).....	72
Figura 55 – Gráfico de Pareto para priorização dos requisitos de cliente (Fonte: autora)....	82
Figura 56 – Casa da qualidade (Fonte: Rozenfeld 2006).....	82
Figura 57 – Integrantes da InovaHouse3D, ABCP e TECRON (Fonte: autora)	90
Figura 58 – Produção de lajes alveolares na TECRON (Fonte: autora).....	91
Figura 59 – Utilização de equipamento na indústria de pré-fabricado (Fonte: autora)	92
Figura 60 – Caçamba dosadora de concreto (Fonte: autora)	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - principais atividades nas indústrias de manufatura versus de construção (Fonte: Adaptado de Warsawski, 1999).....	17
Tabela 2 - Principais fabricantes e processos de PR (Fonte: Adaptado de Kwon, 2002).....	21
Tabela 3 – Métodos intuitivos e sistemáticos de criatividade. (Fonte: Back et al, 2008)	40
Tabela 4 – Barreiras do processo de criação e suas consequências (Fonte: adaptado de Back et al, 2008)	40
Tabela 5 - Alternativa funcional 1 (Fonte: autora).....	48
Tabela 6 – Alternativa funcional 2 (Fonte: autora)	50
Tabela 7 – Alternativa funcional 3 (Fonte: autora)	50
Tabela 8 - Avaliação das alternativas funcionais (Fonte: autora).....	51
Tabela 9 - combinação dos princípios de solução da matriz morfológica (Fonte: autora)	62
Tabela 10 - Requisitos de cliente classificados e ordenados (Fonte: autora).....	81
Tabela 11 – Parte 1 da QFD (Fonte: autora)	84
Tabela 12 – Requisitos de Produto (Fonte: autora)	85
Tabela 13 - – Matriz de Relacionamento (Fonte: autora).....	85
Tabela 14 - Telhado da QFD (Fonte: autora).....	87
Tabela 15 - Especificações meta para a máquina de impressão 3D para concreto (Fonte: autora).....	88

LISTA DE SIGLAS

CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção

MA – Manufatura Aditiva

MVP – *Minimum Valuable Product*

PDP – Processo de Desenvolvimento de Produto

MR – Manufatura Rápida

FDM - Fused Deposition Modeling

PR – Prototipagem Rápida

CAD – *Computer Aided Design*

CAM – *Computer Aided Manufacturing*

CAPP – Computer Aided Process Planning

CIM – *Computer Integrated Manufacturing*

FFF – Fabricação por fusão de filamento

CC – *Contour Crafting*

BIM – *Building Information Modeling*

STL – StereoLitography

IFC – *Industry Foundation Class*

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O aumento da produtividade na construção civil tem caráter urgente, e deve se basear em processos tecnicamente viáveis e eticamente desejáveis. O déficit habitacional totalizou 5.846.040 milhões de brasileiros sem moradia em 2013, de acordo com o banco de dados da CBIC - Câmara Brasileira da Indústria da Construção. A geração de resíduos dos processos construtivos é responsável por 40% a 70% do volume total dos resíduos urbanos (Blumenschein, 2004).

Os métodos construtivos ineficientes e ultrapassados, neste trabalho, são definidos como as principais causas dos impactos ambientais, sociais e econômicos gerados pela indústria da construção civil no Brasil. As técnicas construtivas tradicionais, além de apresentarem alto custo, não garantem desempenho satisfatório, podendo ainda resultar em patologias nas edificações. Diversos fatores são contribuintes para o crescimento constante deste problema, entre os quais merecem destaque: alto índice de desperdícios, aplicações inadequadas de materiais de construção, ausência de mão-de-obra qualificada e de diretrizes construtivas sistêmicas (Santos 1998).

O desperdício de insumos, em torno de 30% em relação ao custo total das edificações (Pinto 1995), é um dos motivadores da busca por novas tecnologias construtivas, que também agregam melhores condições para o controle de obras. Ainda relacionado ao desperdício nos métodos tradicionais, o tempo de perda da mão-de-obra dos serventes pode atingir 50% do tempo total, 100% da argamassa é perdida; e 30% dos tijolos e elementos de vedação se transformam em entulho (Grohmann, 1998).

O processo de industrialização, segundo por Warszawski (1999), é um investimento em equipamentos, instalações e tecnologias com o objetivo de aumentar produção, reduzir o trabalho manual e melhorar a qualidade do produto final. A fim de promover a revolução industrial no setor da construção, a utilização de tecnologia e automação deve ser parte fundamental dos sistemas construtivos.

A adaptação dos princípios de solução da manufatura aditiva (MA) para a construção civil, visa eliminar o desperdício de insumos e geração de resíduos, diminuir o tempo e a mão-de-obra da construção. Entretanto, para a otimização do processo construtivo completo, a utilização de novos paradigmas tecnológicos deve estar associada a um gerenciamento sistêmico do processo.

1.1 CENÁRIO E MOTIVAÇÃO DO PROJETO

Este projeto é resultado da participação da autora na startup InovaHouse3D, formada por uma equipe que busca promover a inovação tecnológica na indústria da construção civil e, em consequência, impactar a sociedade com a melhoria das condições de moradia para população de baixa renda e potencial redução do déficit habitacional no Brasil.

A dificuldade no planejamento e construção do MVP (*minimum valuable product*) motivou o estudo da sistematização do processo de desenvolvimento de produto na startup, devido à complexidade do sistema em questão.

Integrando elementos mecânicos, elétricos e eletrônicos, a impressora 3D é considerada um produto mecatrônico e será objeto de estudo central deste trabalho, juntamente com as metodologias de desenvolvimento produto mecatrônico.

A estrutura mecânica da máquina, suporte para a movimentação nos eixos, deve permitir que um bico extrusor se mova para um lado e para outro (eixo x), para cima e para baixo (eixo y), e toda a estrutura deve ter liberdade para se mover para frente e para trás (eixo z). O sistema elétrico deve energizar a máquina, motores e demais componentes. O sistema eletrônico deve permitir implementar o controle dos motores, o sistema de monitoramento e de segurança.

Basicamente composta por: mecanismo de armazenagem e bombeamento do concreto; bico de extrusão e sistema de controle, a máquina deve ser projetada para se mover nos eixos x, y e z para imprimir um objeto em 3 dimensões. A dificuldade identificada por outros estudos e pesquisas até o momento está na inserção do material no sistema e de seu bombeamento ao sistema de extrusão.

Devido à similaridade das técnicas de FDM e de impressão 3D para concreto, a concepção da máquina será desenvolvida através do estudo comparativo e análise do funcionamento da RepRap (máquina de PR *open-source* e auto replicável).

Este projeto se limita a concepção do módulo de extrusão da máquina, buscando soluções funcionais para o bico extrusor e o controle de seu movimento. Entretanto, faz-se necessário desenvolver a estrutura funcional completa da máquina para fornecer uma visão holística do sistema e para visualizar e definir as interfaces do módulo extrusor com os demais subsistemas.

A partir da estrutura funcional do sistema espera-se desenvolver o protótipo alpha de uma máquina de impressão 3D para concreto, juntamente com a equipe da InovaHouse3D.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste projeto é a concepção do módulo de extrusão de uma máquina de impressão 3D para concreto, baseada nas premissas da prototipagem rápida, para uso na construção civil.

Específicos

- Auxiliar o desenvolvimento de um novo protótipo para a startup InovaHouse3D.
- Avaliar a aplicação de metodologias de desenvolvimento de produto à realidade de startups.
- Apresentar alternativas de concepção para a máquina e módulo extrusor.

1.3 METODOLOGIA

Este trabalho inicia-se com a fundamentação teórica, estabelecida a partir da revisão bibliográfica sobre as áreas do conhecimento relacionadas ao problema de projeto. A revisão bibliográfica aborda 3 tópicos, englobando a indústria da construção civil, Manufatura Aditiva (MA) e Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP).

Realizou-se um estudo das metodologias de PDP, modelos de referência, técnicas e ferramentas mais adequadas ao desenvolvimento de produtos mecatrônicos, extrapolando-os para o contexto de uma pequena empresa de base tecnológica (startup).

Consolidando-se a revisão teórica, buscou-se compreender o processo de impressão 3D para polímeros e seus princípios de funcionamento. Associado ao aprendizado empírico obtido da montagem e compreensão da estrutura da máquina de impressão 3D (projeto RepRap), explorou-se o processo construtivo e suas fraquezas, bem como trabalhos já realizados sobre o uso da MA na construção civil.

Para o desenvolvimento do projeto da máquina proposta, utiliza-se os princípios da engenharia reversa, recomendada por sua eficácia em projeto de produtos pelo modelo de aprendizagem de Kolb, para determinar a estrutura funcional da máquina, detalhadas pelos diagramas IDEF0.

Finalmente, desenvolve-se 3 concepções para o módulo extrusor, condizentes e compatíveis com os demais subsistemas da máquina, como resultado da técnica morfológica aplicada à estrutura funcional do sistema completo da máquina.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em sete capítulos, agrupados em duas etapas principais. A primeira parte refere-se à fundamentação teórica, composta pelo estudo dos principais campos de conhecimento relacionados ao desenvolvimento da máquina de

impressão 3D para concreto (capítulos 2, 3 e 4). E a segunda engloba os capítulos 5 e 6, onde concentram-se as contribuições deste trabalho, validadas através da experimentação e construção do protótipo.

CAPÍTULO 2 - A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

O objetivo deste capítulo é de, sucintamente, contextualizar o setor construtivo brasileiro e seus aspectos gerais, bem como de analisar os benefícios da industrialização do setor. No item 2.1, apresenta-se uma relação causa-efeito dos métodos construtivos ineficientes, sob a ótica do desperdício. Em 2.2, a industrialização da construção civil é comparada a processos típicos de manufatura, apontando a diversidade e particularidade nos projetos de construção e a falta de execução sistêmica como principais razões da lenta evolução do setor. Além disso, com intuito de compreender processos construtivos não tradicionais, a planta típica de uma indústria de pré-fabricados é analisada buscando-se identificar pontos de otimização deste método.

2.1 ASPECTOS GERAIS

Para que a mudança de paradigmas tecnológicos dos processos construtivos viabilize a industrialização no setor da construção, o sistema construtivo como um todo deve estar preparado, criando condições adequadas para otimização do setor, alinhados sob um gerenciamento sistêmico e eficiente dos projetos de construção.

A construção civil impacta a sociedade ambientalmente, devido ao alto nível de desperdício de insumos e emissões de CO₂; socialmente, como uma das responsáveis pelos elevados índices do déficit habitacional brasileiro; e economicamente, pelo alto custo agregado aos empreendimentos em geral.

Para orientar e mapear as oportunidades de desenvolvimento deste trabalho, estabeleceu-se uma relação de causa e efeito da problemática dos métodos construtivos, sob a ótica do desperdício, conforme esquematizado na figura 1.

Os principais agentes causadores do desperdício, para métodos construtivos ainda predominantemente utilizados no Brasil, foram definidos como: o setor conservador, resistente ao uso de tecnologias, o uso inadequado de materiais, provável causador de patologias nas edificações, e a execução não sistêmica das fases dos projetos de uma obra (anteprojeto, projeto básico e projeto executivo).

Os principais agentes causadores do desperdício, para métodos construtivos ainda predominantemente utilizados no Brasil, foram definidos como: o setor conservador, resistente ao uso de tecnologias, o uso inadequado de materiais, provável causador de patologias nas edificações, e a execução não sistêmica das fases dos projetos de uma obra (anteprojeto, projeto básico e projeto executivo).



Figura 1 - Relação causa efeito para os métodos construtivos ineficientes (Fonte: Autora)

Como efeito do alto volume de desperdício, tem-se um cenário de déficit habitacional e alto custo de moradia. As patologias nas edificações impactam os empreendimentos da construção civil a longo prazo, causando desastres e desabamentos, e a curto prazo demandando reparos recorrentes obras recentes. O desperdício neste caso está no retrabalho e nas soluções paliativas geralmente implementadas.

2.2 INDUSTRIALIZAÇÃO DO SETOR CONSTRUTIVO SEGUNDO WARSZAWSKI (1999)

Os ganhos em produtividade e qualidade, decorrentes da revolução industrial nas indústrias de manufatura, ainda não alcançaram progresso similar na indústria da construção civil. Segundo Warszawski, apenas através da industrialização do setor e da automatização, substituindo trabalho manual em todas as fases no processo de construção, é possível alcançar o progresso na construção civil.

A industrialização deve considerar aspectos tecnológicos, gerenciais e econômicos. Além da implementação e uso de tecnologia da informação no canteiro de obra. A revolução da informação, em meados do Séc. XX, impactou consideravelmente os projetos na construção e alguns aspectos relacionados a administração. Entretanto, esses impactos no processo de construção do canteiro de obra ainda são muito limitados e pouco relevantes, principalmente devido à falta da consolidação da industrialização.

O desafio tecnológico para permitir o progresso do setor está em estender processos industrializados para o canteiro de obra, visando a automação do trabalho *in loco* em todas as etapas factíveis. Considera-se uma efetiva industrialização da construção quando componentes e elementos são, em sua maioria, pré-fabricados em indústria com equipamentos e tecnológicos e métodos gerenciais apropriados. Elementos pré-fabricados reduzem consideravelmente a quantidade de trabalho no canteiro de obra, da dependência de habilidades manuais, de condições ambientais e outras restrições locais.

Ainda segundo Warsawski (1999), o processo de industrialização é definido como um investimento em equipamentos e tecnologias com o propósito de aumentar a produtividade e a qualidade, reduzindo trabalho manual. Um alto grau de industrialização é caracterizado por: centralização da produção; produção em massa, padronização, especialização, organização dos processos e integração.

Entretanto, com as ferramentas computacionais, novas dimensões foram adicionadas ao processo de industrialização, não necessitando de grandes produções em série, padronização ou ainda especialistas para tornar factível a evolução industrial do setor. Em contrapartida, a utilização de recursos automatizados na construção e em projetos arquitetônicos, reduzem a importância do trabalho especializado em atividades individuais e exigem a compreensão do processo como um todo, além do domínio da tecnologia envolvida.

A partir da comparação das indústrias de manufatura e de construção, percebe-se o potencial da tecnologia robótica, ou impressão 3D, para melhoria da maioria dos processos na construção. Na tabela 1, os itens 1, 4, 5, 6 e 7 seriam revolucionados com a construção automatizada no canteiro de obra.

Tabela 1 - principais atividades nas indústrias de manufatura versus de construção (Fonte: Adaptado de Warsawski, 1999)

#	Indústrias de manufatura	Indústria da construção
1	Todas atividades executadas em um local fixo na fábrica	Trabalho disperso entre locais temporários no ambiente de construção
2	Curta a média vida útil do produto	Longa vida útil do produto
3	Alto grau de repetição e padronização	Cada projeto tem diferentes recursos
4	Pequena quantidade de tarefas simples necessárias para execução do produto	Grande quantidade de tarefas demandando habilidades manuais para finalizar o produto
5	Todas atividades desenvolvidas em estações de trabalho fixas	As atividades são desenvolvidas dentro uma grande área de trabalho, necessitando que os trabalhadores estejam em constante locomoção
6	Espaço de trabalho cuidadosamente ajustado as necessidades humanas	Ambientes de trabalho desagradável
7	Equipe de trabalho estável	Alta rotação de trabalhadores

O uso da automatização pode ainda beneficiar o setor construtivo mesmo que não seja utilizado nos canteiros de obra. No caso da pré-fabricação de elementos construtivos, o processo demanda logística de transporte, entretanto a economia de tempo e ganho de produtividade devem ser avaliados para decisão do método construtivo mais adequado em cada projeto.

A figura 2 ilustra o processo de fabricação de uma indústria típica de pré-fabricados ou pré-moldado. O processo se inicia com a preparação de formas (*frame assembling*) e alocação da malha de aço (*steel mesh assembling*), que compõe a resistência final do elemento produzido.

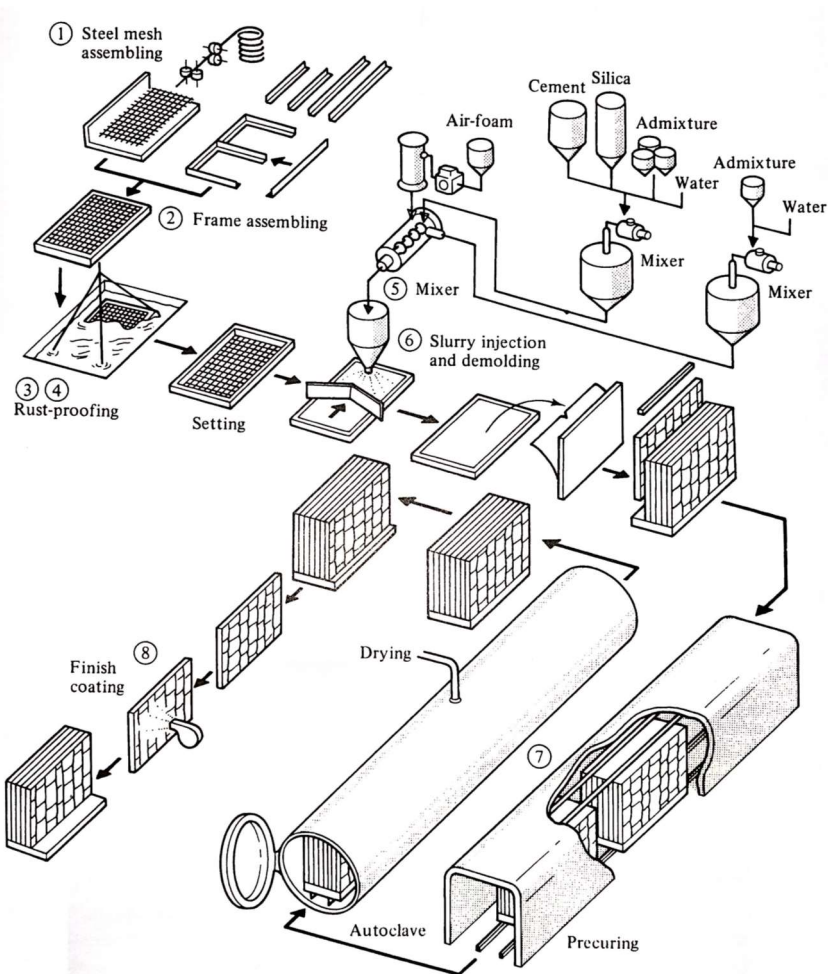


Figura 2 – Processo típico de produção de elementos de parede pré-fabricados (Fonte: Warszawski, 1999)

Após testes de resistência (*rust-proofing*) o material é despejado sobre esta malha e encaminhado ao ambiente de pré-cura (*pre-curing*), seguindo para a autoclave para secagem e, finalmente, para o acabamento final (*finish coating*).

Extrapolando-se o processo apresentado na figura 2, a manufatura aditiva aplicada a este processo pode eliminar o uso de formas, proporcionando alto grau de liberdade para

construção a partir da modelagem computacional. Os princípios produtivos e processos típicos da MA serão detalhados no capítulo 3.

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No cenário atual da construção civil ainda predominam metodologias construtivas de alvenaria tradicional com pouco ou nenhum uso de tecnologia e equipamento. No caso de processos construtivos com pré-moldados a utilização de equipamentos é mais significativa, apesar de ainda existirem muitas etapas manuais.

Neste trabalho, o problema dos métodos construtivos ineficientes é abordado sob a ótica do desperdício, que pode ser solucionado utilizando-se tecnologias que não geram resíduos durante seu processo de fabricação, como por exemplo, a adaptação da técnica FDM (capítulo 3).

Comparado aos métodos tradicionais existentes, todo e qualquer novo processo construtivo resultará em adaptações e dificuldades iniciais. Logo, a implementação da automatização do processo construtivo através da tecnologia de impressão 3D implica em elevar a complexidade do processo de maneira incomparável. Por outro lado, haverá uma redução de trabalho manual no canteiro de obra, que pode chegar a 40-50% em comparação ao método de alvenaria tradicional.

A grande desvantagem da indústria de pré-moldados está na utilização de formas que são específicas para cada elemento e, em sua maioria, não são reutilizadas gerando entulho na produção. Neste ponto, a automatização e impressão 3D se apresenta mais uma vez como vantajosa.

CAPÍTULO 3 - MANUFATURA ADITIVA

O objetivo deste capítulo é apresentar os princípios da manufatura aditiva (MA) e seus processos típicos, bem como relacionar processos da MA à construção civil. No item 3.1, apresenta-se a MA e os diferentes processos de prototipagem rápida (PR). Em seguida, o projeto RepRap é contextualizado, fundamentando conhecimentos sobre o processo FDM. Extrapolando-se este processo, apresenta-se uma técnica híbrida de FDM, *Contour Crafting*, aplicável à realidade da construção civil. E, a partir das diferentes concepções existentes, o item 3.4 analisa a MA aplicada à construção civil, semelhanças ao processo de PR e desafios para consolidação da tecnologia.

3.1 ASPECTOS GERAIS

A manufatura aditiva, também conhecida por prototipagem rápida, é um processo de fabricação baseado na adição de material em camadas planas que surgiu no final dos anos 80, devido à crescente necessidade da indústria em reduzir custos no processo de desenvolvimento de produto.

O princípio básico da tecnologia da manufatura aditiva (MA) é a estratificação e sobreposição de camadas. Juntamente com tecnologias de modelação física, a MA viabiliza a produção rápida de protótipos ou mesmo peças funcionais, com todas as propriedades físicas e mecânicas desejadas. Além disso, não há a necessidade de moldes ou ferramentas como ocorre em máquinas CNC convencionais, nem mesmo para fixação de peças em mesas de construção.

Embora existam diferentes processo de prototipagem rápida, todos baseiam-se nas seguintes etapas (Kwon, 2002):

- Modelagem em CAD
- Conversão do modelo CAD em formato STL
- Fatiamento do STL em finas camadas ou cortes transversais
- Construir o modelo físico através da superposição de camadas
- Limpeza e finalização do modelo

A modelagem de um objeto auxiliada por computador (Computer-Aided Design – CAD) pode ser feita em inúmeros softwares CAD que utilizam diferentes algoritmos para representar os objetos sólidos. Para padronizar o processo de PR, independentemente da ferramenta CAD, definiu-se o formato STL como padrão.

O formato STL transforma uma superfície 3D em uma combinação de triângulos, criando um arquivo com as coordenadas dos vértices da malha de triângulos que cobrem a

superfície do modelo CAD e a direção do vetor normal a cada triângulo. Esse formato não permite reproduzir superfícies curvas precisamente, pois é formado por elementos planos. Quanto maior o número de triângulos utilizados na aproximação, mais precisamente a superfície pode ser reproduzida e maior será o tamanho do arquivo, necessitando de um maior tempo de processamento.

O processo de fatiamento depende da acurácia e qualidade desejada da superfície, diretamente relacionado a espessura da camada e tempo de impressão. Dependendo do modelo, estruturas auxiliares são geradas no processo de fatiamento para apoiar a estrutura como um todo. A maioria das máquinas de PR requerem mínima intervenção humana ao longo do processo de impressão.

3.1.1 Tipos de processos

As técnicas de prototipagem rápida são classificadas em 5 categorias, a saber:

- Fotopolimerização (*selective photocuring*)
- Sinterização seletiva (*selective sintering*)
- Adesão laminar (*adhesion of cut sheets*)
- Extrusão roboticamente guiada (*robotically guided extrusion*)
- Deposição de aglutinadores para pó (*droplet deposition on powder*)

Tabela 2 - Principais fabricantes e processos de PR (Fonte: Adaptado de Kwon, 2002)

Fabricante	Nome do processo	Tipo de processo
3D System	Estereolitografia (SLA)	Fotopolimerização
Helisys	Manufatura de objetos em lâminas (LOM)	Adesão laminar
Stratasys	Modelagem por fusão e deposição (FDM)	Extrusão roboticamente guiada
DTM	Sinterização seletiva a laser (SLS)	Sinterização seletiva
Soligen	Produção de molde (DSPC)	Deposição de aglutinadores para pó
BPM	Manufatura com particular balística (BPM)	Deposição de aglutinadores para pó

A tabela 2 apresenta os principais fabricantes para cada tipo de processo. Dentre eles, SLA, LOM, FDM, SLS, DSPC e BPM.

Para melhor compreensão das considerações feitas neste trabalho, é pertinente apresentar uma breve explicação do processo FDM - patenteado pela Stratasys e não pode ser utilizado indiscriminadamente. Sendo assim, adotam-se como sinônimos de FDM: processo de extrusão roboticamente guiada ou FFF (Fabricação por fusão de filamento) – criado pelo projeto RepRap sem restrições quanto ao seu uso.

Tal processo força a passagem de um material termoplástico por um bico extrusor controlado por um braço robótico, de forma a aplicar o material fundido na posição desejada, formando uma camada. As camadas subsequentes são, então, repetidas da mesma forma, para fabricar o objeto completo.

O FDM utiliza um filamento termoplástico fundido em um cilindro, um líquido e uma pasta que são depositados camada por camada para criar o objeto através de sua extrusão por um bico injetor. Enquanto o bico extrusor é guiado automaticamente seguindo a geometria definida, ele deposita uma fina gota de plástico extrusado para formar cada camada. O plástico é imediatamente solidificado em uma câmara quente, onde a temperatura está ligeiramente abaixo do ponto de fusão do plástico, depois de extrusado do bico e fundido à camada anterior. Qualquer geometria pendente deve ser fabricada com estruturas de suporte que são removidas posteriormente em operações secundárias.

A principal vantagem do processo FDM em comparação as demais técnicas de PR está na produção de modelos de forma rápida e barata; onde não há geração de resíduos durante a fabricação do modelo. Como desvantagem têm-se a precisão restrita, devido ao formato do material empregado (Kwon, 2002).

3.2 PROJETO REPRAP

O projeto RepRap, fundado por Adrian Bowyer, deu origem a uma impressora 3D, do tipo FDM, de baixo custo e fácil montagem, que tem a capacidade de se auto reproduzir, necessitando apenas de algumas peças complementares para possibilitar a montagem completa da máquina. O projeto facilita a difusão da tecnologia entre usuários comuns. (Jones, 2009).

A primeira geração de máquinas recebeu o codinome Darwin, e a segunda codinome Mendel. Os materiais compatíveis são os plásticos ABS e PLA. A RepRap é uma iniciativa acadêmica, que conta com financiamentos externos, e não impõe barreiras para a sua popularização. Todo o sistema da máquina, hardware, circuitos, software e processo de montagem é disponibilizado na página do projeto (Reprap, 2016), onde são reunidos os trabalhos em andamento para aperfeiçoamento da concepção original.

A estrutura da RepRap é agrupada em 4 módulos, a saber, módulo de software, de eletrônica, de mecânica e de extrusão. A figura 3 apresenta estes módulos com seus subsistemas e componentes.

O módulo 1 engloba ferramentas CAD (*Computer Aided Design*), CAM (*Computer Aided Manufacturing*) e o *firmware*. Para realizar a modelagem do sólido 3D (*design*) a ser impresso, faz-se necessário o uso de um software CAD e o arquivo (*files*) deve ser inserido

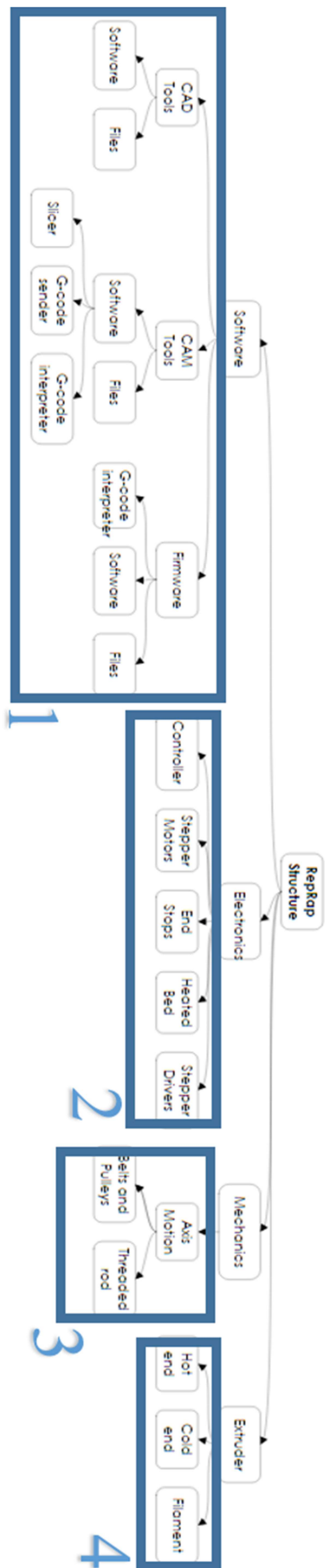


Figura 3 – Estrutura da RepRap (Fonte: RepRapwiki, 2016)

no sistema com o formato apropriado. O G-code, comumente utilizado em máquinas CNC, é gerado após a execução do *slicer* e é enviado ao *firmware* da máquina através de um software de interface. O segundo módulo diz respeito aos componentes eletrônicos do sistema, basicamente: controlador (*controller*), motor de passo (*stepper motor*), sensor de fim de curso (*end stop*), mesa aquecida (*heated bed*) e drivers de passo (*stepper drivers*). O módulo 3, referente a parte mecânica, representa os eixos de movimento da máquina (*axis motion*), roldanas e correias (*belt and pulleys*), e varões roscados (*threaded rod*). E finalmente, o módulo 4, descreve o extruder que envolve terminais quente e frios (*hot end* e *cold end*), responsáveis pela injeção e fusão do filamento de polímero (*filament*).

A manufatura rápida (MR) é uma extensão natural do processo de PR. No contexto da construção civil, pode ser aplicada através da técnica híbrida de FDM, patenteada como *Contour Crafting*. Essa técnica será explicada na próxima seção.

3.3 TÉCNICA HÍBRIDA DE FDM

As técnicas de prototipagem rápida apresentadas na seção anterior, em sua maioria aplicáveis a materiais plásticos ou polímeros, foram extrapoladas para processos que envolvem materiais cerâmicos. O *Contour Crafting*, uma das técnicas com materiais cerâmicos mais referenciadas, é uma tecnologia de fabricação aditiva desenvolvida na University of Southern California.

Contour Crafting (CC) é processo híbrido de FDM pois, apesar de não envolver aquecimento e fusão de material durante a extrusão, o processo de extrusão e moldagem por injeção assemelha-se ao FDM. Como ocorre com polímeros, materiais cerâmicos (por exemplo argila) são submetidos à uma pressão resultante da força exercida pelo bico extrusor e o contato com as camadas de base, ainda semi-sólidas.

Devido aos desafios na determinação dos efeitos da pressão no momento da deposição de materiais cerâmicos não curados, o processo de fabricação CC ainda não foi caracterizado quantitativamente, apesar de terem sido aproximados por métodos de elementos finitos e da diferença finita.

Através da realização de estudos empíricos e investigativos, segundo Kwon (2002), definiu-se o estado semi-sólido da argila com as configurações ideais para o processo CC. Neste estado, a argila apresenta suficiente força de cisalhamento para suportar a pressão no ponto de deposição, é um material trabalhável e fluido, e a quantidade de bolhas de ar é mínima comparado ao estado plástico.

Estudos sobre os efeitos da fusão em polímeros, concluem que a taxa de deformação aumenta com a diminuição da viscosidade. No caso da argila, não ocorre deformação na

Foundation Class), obtido de software BIM (*Building Information Modeling*), como por exemplo REVIT, contém informações da estratificação de camadas, material, cor e contornos.

A transformação da modelagem computacional à realização física do modelo é comparada na figura 5 para processos com arquivo CAD e STL ou IFC. Para cada estágio do processo são indicados a dimensão e o formato do arquivo. Ainda da figura 5, a parte (a) representa as transformações de modelo e de dimensão para o processo de impressão 3D com polímeros, onde o arquivo padrão para impressão deve ser o STL, modelo composto apenas pela casca (*shell*) do sólido 3D modelado. Já na parte (b), que representa a evolução da dimensão e modelos para um processo de impressão 3D aplicado à realidade da construção civil, o arquivo do sólido 3D é inserido no sistema através de um modelo IFC. Este modelo inclui além da modelagem em 3D de um sólido qualquer, informações de cor, material e ou necessidades de construção específicas de cada projeto, o que possibilita uma comunicação e compatibilidade de arquivos entre os diversos profissionais do sistema construtivo, desde o projeto arquitetônico a detalhamento de antes projeto e projeto executivo da obra.

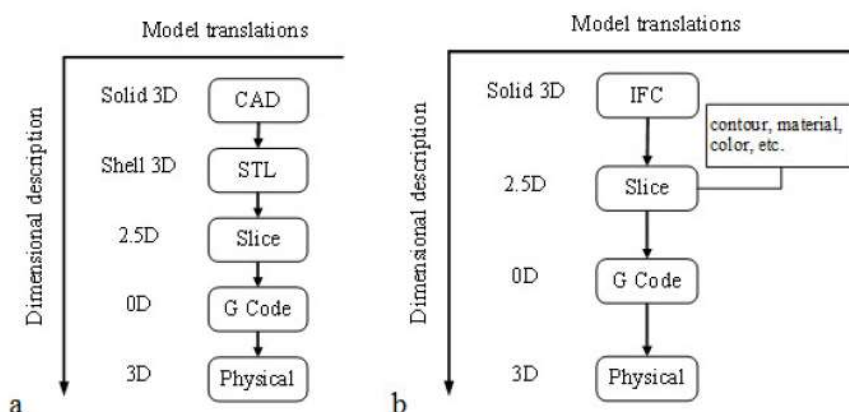


Figura 5 – Modelagem computacional para modelagem física (Fonte: Lieyun, 2014)

Apesar de serem processos muito similares, a consolidação dos softwares para interface de impressão para polímeros e o padrão STL é muito maior quando comparada a utilização e compatibilidade da modelagem das informações de construção com arquivos IFC.

3.4.1 Sistemas de impressão 3D para concreto

Projetos em diferentes níveis de maturidade para desenvolver a tecnologia de impressão 3D para concreto vem sendo desenvolvidos em nível mundial. No Brasil, além da InovaHouse3D, existe também a Urban3D com proposta similar.

Dentre os projetos que já alcançaram maturidade suficiente para imprimir casas e outras estruturas arquitetônicas, os mais relevantes são: *Contour Crafting*, da *University of*

Southern Califórnia (Khoshnevis, 2000); D-shape da empresa British Monolite; *Concrete Printing Process*, da *Loughborough University (Lim et.al., 2009)* e o projeto da empresa Totalkustom de Andrey Rudenko.

O projeto *Contour Crafting*, liderado pelo Doutor Khoshnevis é pioneiro nos estudos da aplicação da manufatura aditiva na construção civil. Este projeto desenvolveu e patenteou a técnica híbrida de FDM apresentada anteriormente, e permite construir automaticamente uma casa ou edifício, conforme ilustrado na figura 6, por um sistema de extrusão roboticamente guiado. Maior detalhamento do projeto pode ser encontrado em Khoshnevis (2000) e Kwon (2002), além dos dados compartilhados através do portal do projeto (*Contour Crafting, 2016*).



Figura 6 – Impressão de um edifício utilizando-se a técnica CC (Fonte: *Contour Crafting, 2016*)

O sistema 3D para impressão de concreto, desenvolvido por Andrey Rudenko, é compartilhado em seu portal, onde já estão sendo aceitas encomendas para a compra de impressoras 3D para concreto em diversos portes. Estas máquinas apresentam:

- Sistema de movimento (braço robótico);
- Sistema de extrusão (cabeça de impressão com bico);
- Planta de mistura portátil (triagem de areia, misturas);
- Sistema de bombeamento de material (controlado eletronicamente);
- Caixa de controle (eletrônica, sistema de controle e posicionamento);
- Sistema de monitoramento (câmeras e monitores para acompanhar o processo de impressão);
- Sistema de segurança (prevenção e desligamento do sistema quando necessário).

Fotos e vídeos deste sistema e das casas construídas também estão disponíveis no portal da TotalKustom (Rudenko, 2016). O sistema de extrusão pode ser visto na figura 7, e está acoplado a uma ponte rolante que permite a movimentação do bico no espaço de construção.



Figura 7 – Impressão de um hotel por TotalKustom (Fonte: Rudenko, 2016)

Detalhes sobre a cura do concreto e intercalação de armação para suportar os esforços de tensão da construção não são fornecidos. Ainda pouco se sabe sobre as propriedades do concreto resultante do processo de extrusão guiada roboticamente.

Projetos de graduação e mestrado também vem sendo executados na tentativa de construir protótipos e avaliar a trabalhabilidade do concreto no processo de extrusão. O trabalho de mestrado, *Concrete 3D printer*, da universidade sueca *Lund University*, utilizou uma concepção de máquina inovadora (Figura. 8), ao acoplar um braço robótico no sistema, aumentando o grau de liberdade da impressão (Anell, 2015). Este projeto foi base para o desenvolvimento inicial do protótipo apresentado no capítulo 7 deste trabalho.

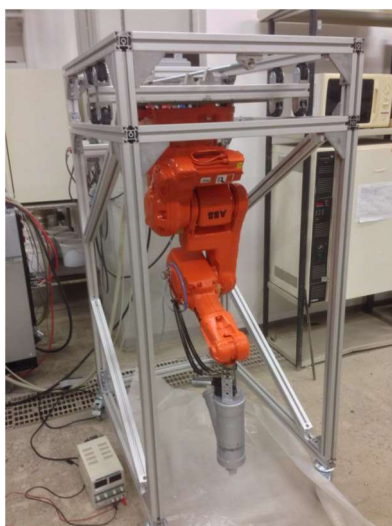


Figura 8 – Braço robótico acoplado a bico extrusor (Fonte: Anell, 2015)

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O acesso a equipamentos de prototipagem rápida, promovidos pela inovação aberta e baixo custo de projetos com inovação aberta, como o da RepRap, facilitam a difusão e consolidação da tecnologia de impressão 3D.

O processo de extrusão roboticamente guiada (FFF ou FDM) é o mais utilizado e comercializado para apoiar o processo de desenvolvimento de produtos, por sua simplicidade de utilização, rapidez de impressão e qualidade razoável dos produtos reproduzidos (Kwon, 2002). Essa tecnologia foi base para a criação do processo *Contour Crafting*, um dos pioneiros na adaptação da manufatura aditiva para materiais cerâmicos.

A maior dificuldade identificada até o presente momento referentes a utilização de tecnológicas de manufatura aditiva para materiais cerâmicos ou concreto está na inserção do material no sistema e de seu bombeamento ao sistema de extrusão (Lim, 2011).

CAPÍTULO 4 - DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

Este capítulo visa fundamentar o desenvolvimento de produtos, ressaltando a importância de um processo bem estruturado. São apresentadas três abordagens para processos de desenvolvimento de produtos, utilizadas como base deste trabalho. Em seguida, são conceituadas as principais técnicas e ferramentas também utilizadas neste projeto.

Neste trabalho, o desenvolvimento de produtos será aplicado a um produto mecatrônico (capítulo 5), combinando e adaptando os modelos e técnicas estudadas ao cenário do projeto.

4.1 IMPORTÂNCIA DAS FASES INICIAIS DE PLANEJAMENTO

O desenvolvimento de produtos no ambiente de negócios é um dos processos mais relevantes na agregação de valor a um produto. É responsável por cerca de 70 a 90% do custo final do produto e de outros fatores relacionados à qualidade, à diversificação e tempo de introdução no mercado (Takahashi, 2007).

Segundo Back (2008), a atividade de planejamento e projeto implica diretamente na competitividade dos produtos e pode-se afirmar que um projeto conceitual, bem elaborado desde o início, evita elevados custos de modificação no produto em estágios avançados de desenvolvimento.

Das figuras 9 a 11, pode-se analisar o comprometimento do custo do produto no início do ciclo de vida, as influências sobre o custo do produto devido às tomadas de decisões, material, mão-de-obra e instalações, e o efeito escala de custos de mudança no produto em diferentes etapas do desenvolvimento.

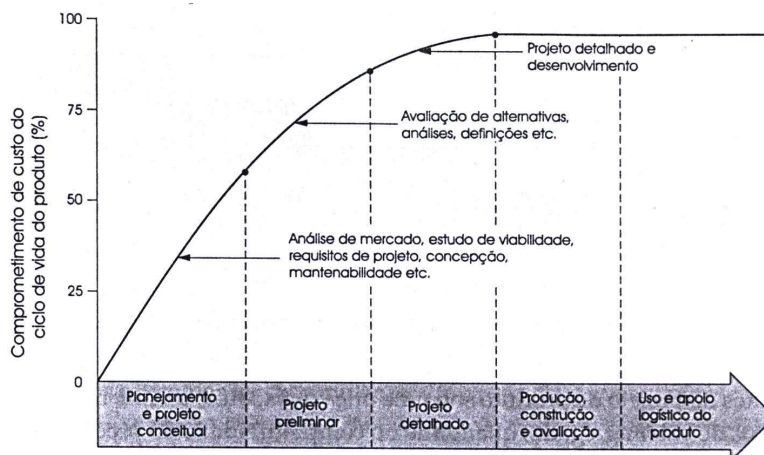


Figura 9 - Comprometimento do custo ao longo do ciclo de vida do produto. (Fonte: Downey, 1969)

Em análise do ciclo de vida do produto (Fig. 9), percebe-se que mais de 50% dos custos do produto é comprometido na fase de planejamento e projeto conceitual, fases responsáveis por análise de mercado, estudo de viabilidade preliminar, requisitos de projeto e geração da concepção do produto. Tais concepções comprometem o processo de manufatura, fornecedores, disponibilidade de peças e componentes local, manutenção e descarte com a definição da concepção e execução do projeto preliminar.

O efeito escala (Fig. 10), ou aumento do custo de mudanças no produto ao longo dos seus estágios de desenvolvimento, considera que o custo de alteração cresce em progressão geométrica de razão 10 a cada fase (Rozenfeld 2006). E, portanto, as fases iniciais de projeto são cruciais para garantir vantagem competitiva do produto bem como detectar e corrigir problemas com baixo custo de mudança.

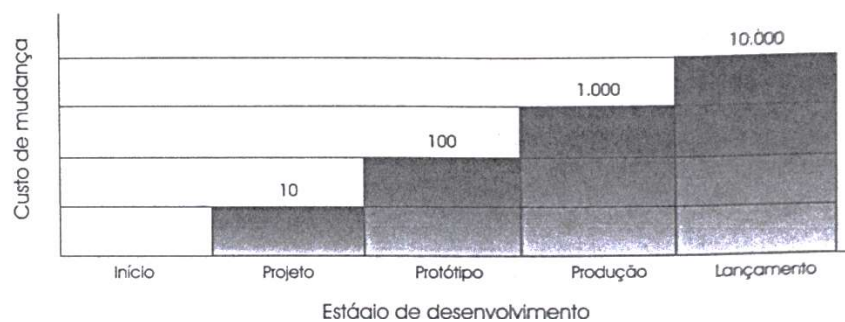


Figura 10 - Efeito escala (Fonte: Rozenfeld 2006)

A contabilidade do custo total do produto inclui despesas com projeto, matéria-prima ou material de produção, mão-de-obra e instalações ou local de produção (Fig. 11). Os gastos com projeto, apesar de relativamente bem menores quando comparados aos gastos com material de produção, tem a maior influência no custo total do produto, chegando a 70%.

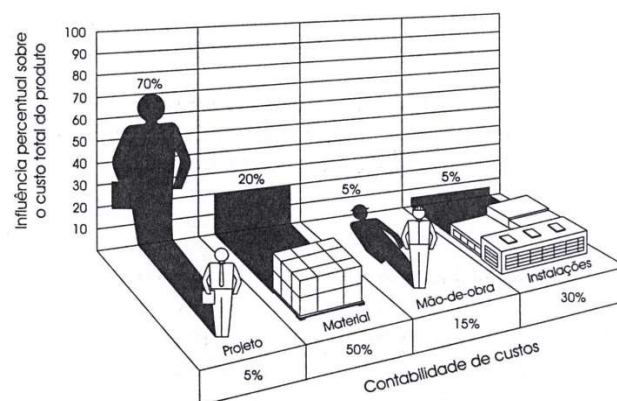


Figura 11 - Influência sobre o custo total do produto (Fonte: Smith e Reinertsen, 1991)

Ressaltada a importância das fases iniciais de projeto, as seções seguintes apresentam diferentes abordagens para desenvolvimento de produtos, bem como técnicas e ferramentas, visando estruturar um processo de PDP adequado a este trabalho para garantir um projeto com qualidade e minimizar risco de falhas ao longo da execução.

4.2 ABORDAGENS DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

O processo de desenvolvimento de produto (PDP) envolve todas as atividades para trazer um novo conceito de produto para o estágio de mercado. Desde a inspiração inicial do novo produto à análise de mercado, projeto de engenharia, planejamento de manufatura e validação do projeto de produto em conformidade com todos esses aspectos. Dentro desse processo, o projeto de produtos (*design process*) é o conjunto de atividades técnica responsável por converter a visão inicial do produto em especificações técnicas para desenvolver uma nova concepção. O processo de manufatura, quando os produtos são fisicamente construídos, não faz parte do PDP mas é geralmente projetado em paralelo, baseado nas premissas da engenharia simultânea (Otto e Wood, 2001).

4.2.1 Desenvolvimento Integrado de Produtos segundo Back, et al. (2008)

Back, et al. (2008) propõe o modelo de Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (PRODIP), descomposto em três macro fases (Fig. 12): Planejamento do projeto, Elaboração do projeto de produto e implementação do lote piloto.

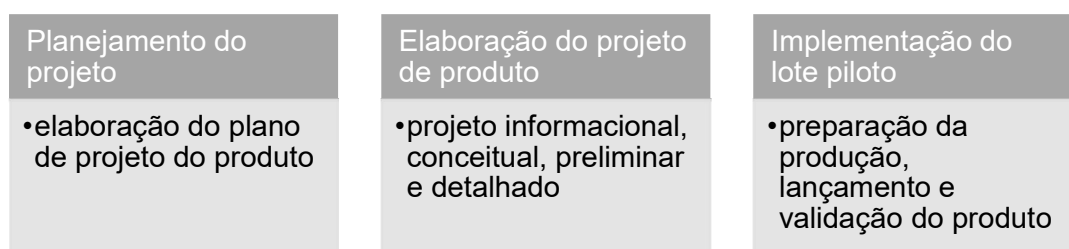


Figura 12 – Macro fases do PRODIP (Fonte: baseado em Back et al, 2008)

A elaboração do projeto do produto inclui as fases próprias da execução do projeto para tornar concretas as demandas dos usuários, na forma do produto avaliado técnico e economicamente. São consideradas as fases próprias do processo de projeto de produto: projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado. No decorrer do projeto, as necessidades dos clientes e os requisitos do projeto são convertidos em soluções para o produto e possibilitam sua realização física.

Projeto informacional: definição das especificações de projeto do produto, nela acontece a primeira reunião da equipe de desenvolvimento, para a apresentação do plano de projeto.

Projeto conceitual: desenvolvimento da concepção do produto, fase iniciada com a orientação da equipe de desenvolvimento a respeito das atualizações do plano do projeto.

Projeto preliminar: definição do leiaute final do produto, viabilidade técnica e econômica. Novamente, o trabalho é iniciado com a orientação da equipe de desenvolvimento a respeito das atualizações do plano do projeto.

Projeto detalhado. A fase está destinada a vários propósitos: (a) aprovação do protótipo; (b) finalização das especificações dos componentes; (c) detalhamento do plano de manufatura; (d) preparação da solicitação de investimento. Após a orientação da equipe a respeito das atualizações e demais, o protótipo é construído finalizando com os testes de laboratório e de campo, de acordo com especificações emitidas na fase anterior. Segundo Back, et al. (2008) durante a realização dos testes, são aplicadas diversas análises, como a de segurança do protótipo e/ ou componentes do produto.

A implementação do lote piloto é iniciada com a preparação da produção, seguida da produção de um lote inicial e lançamento do produto no mercado. O projeto é então encerrado com a validação do produto pelos usuários e cliente de projeto.

A Figura 13 apresenta uma visão geral do modelo desenvolvido, suas macrofases, fases, atividades e tarefas.

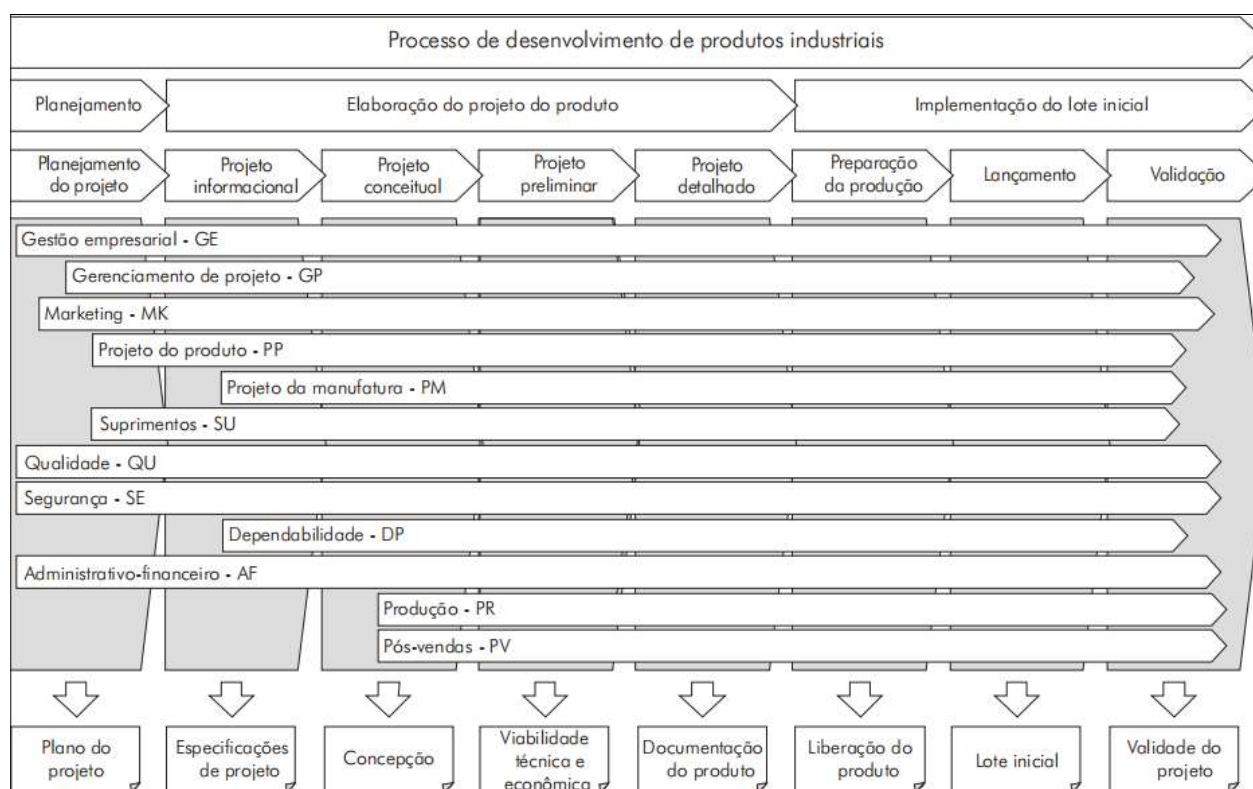


Figura 13 – Representação gráfica do modelo PRODIP (Romano, 2003)

A concepção de um produto, entrega da fase de projeto conceitual, é o objetivo central deste trabalho. Sendo assim, para finalizar o PDP faz-se necessário desenvolver os projetos preliminar e detalhado.

4.2.2 Desenvolvimento de Produtos e Técnicas para Engenharia Reversa segundo Otto & Wood (2001)

Baseado em um modelo-central e em abordagens de sistemas para realizar um projeto de produto, a sistemática de Otto e Wood (2001) propõe a exploração das atividades

do projeto na seguinte ordem: isolar cada atividade, entender o que é requerido como entrada e o que é produzido como saída, e então definir os métodos aplicáveis para concluir cada atividade. Tal sistemática minimiza falhas ao longo do PDP e é focada no projeto de produtos. O *stage-gate*, ou pontos de avaliação, é adotado como processo de desenvolvimento de produtos e definido como um conjunto de atividades compreensíveis. Aprendizados de fases anteriores são formalizadas, correções de curso são feitas e eventuais decisões de interrupção do desenvolvimento podem ser tomadas.

Segundo Otto e Wood (2001), cada setor industrial tem um PDP diferente, alinhado com as especificidades do produto, e não existe um processo ideal aplicável a tudo e a todos. A sofisticação do produto, a competitividade do mercado, a taxa de inovação das tecnologias envolvidas e outros fatores configuram o processo de cada indústria unicamente.

Em alto nível, Otto e Wood (2001) definem o PDP em três fases:

- Compreendendo a oportunidade: envolve as atividades de decisão para iniciar os esforços do desenvolvimento de um novo produto.
- Desenvolvendo o conceito: envolve as atividades de decisão sobre o que será o produto que atenda a oportunidade em questão.
- Implementando o conceito: envolve as atividades que garantem o bom desempenho e funcionamento do produto ao longo do tempo.

Estas fases se repetem e são reavaliadas até que o produto esteja pronto para fase de manufatura. E através delas, espera-se categorizar os esforços envolvidos, facilitando a organização e fluidez do PDP.

Em qualquer fase há realização de atividades simultâneas, projeto mecânico, elétrico e desenvolvimento de software ocorrem em paralelo. Para garantir a compatibilidade dessas atividades, diversos pontos de avaliação (*gates*) são criados para que a execução da próxima fase siga sem maiores dificuldades.

Devido à complexidade do PDP, inúmeras sobreposições de atividades, e dificuldades na prática, a abordagem de engenharia reversa é proposta neste modelo por ser mais apropriada ao aprendizado do processo de PDP.

O processo de desenvolvimento de um produto já existente no mercado, sob a abordagem da engenharia reversa, permite aplicar todas as etapas do ciclo de aprendizagem de Kolb (Otto e Wood, 2001), com quantas iterações sejam necessárias para consolidar o aprendizado e para otimizar o produto em desenvolvimento. A visualização ou realização física de ideias ou modelos desde o início do PDP auxilia na compreensão do problema e desenvolvimento de concepções alternativas.

Em concordância com o modelo de aprendizagem de Kolb (Otto e Wood, 2001), o estudo da engenharia deve ser igualmente focado em atividades práticas e teóricas pois, sem experiências concretas não é possível construir um aprendizado teórico bem consolidado.

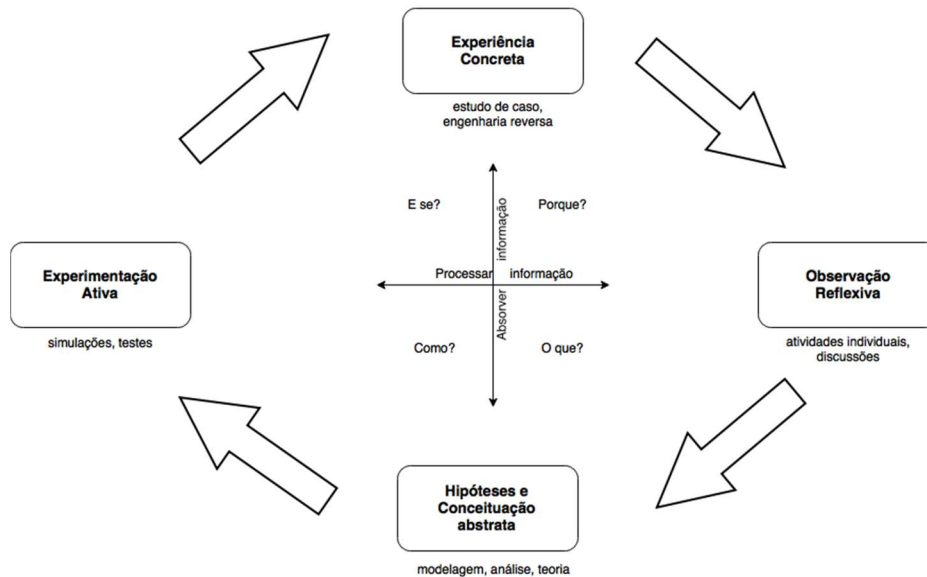


Figura 14 – Modelo de aprendizagem de Kolb (Fonte: Adaptado de Otto e Wood, 2001)

A figura 14 ilustra o processo de Kolb (Otto e Wood, 2001) começando pela fase de aprendizagem concreta, seguida da observação reflexiva e hipóteses, finalizando com a experimentação ativa. Neste modelo, primeiro se absorve informação por experiência concreta, estudo de casos ou engenharia reversa, e após discutir e refletir (“Porque?” e “O que?”) a informação é fundamentada de maneira teórica. O processamento das informações é finalizado com a experimentação ativa, permitindo avaliar o funcionamento (“Como?”) e o efeito de alterações (“E se?”).

A identificação de um produto em nível de componentes e respectivas inter-relações, para mapear o princípio de funcionamento e posterior definição da estrutura funcional sistema, é realizada através da engenharia reversa.

A metodologia de engenharia reversa, para fins de comparação e estudo de produtos concorrentes, é uma atividade ética e legal que permite contornar invenções patenteadas aplicando-se novos princípios de solução para um mesmo resultado.

4.2.3 Desenvolvimento de Sistemas Mecatrônicos segundo Hehenberger (2014)

Devido ao alto grau de integração e interconexão da engenharia mecânica, elétrica e da tecnologia da informação, produtos mecatrônicos são considerados complexos e tem

alta probabilidade de mudanças de escopo ao longo da execução do projeto (Hehenberger et al, 2010).

Um método de projeto de produtos auxilia engenheiros e especialistas de diferentes áreas na integração das atividades para desenvolver sistemas complexos. Baseados nas abordagens de engenharia simultânea e produção enxuta, diversos modelos de desenvolvimento de produto mecatrônico vem sendo propostos, entretanto, ainda há uma carência no desenvolvimento de produtos mecatrônicos quanto à metodologias e ferramentas (Zheng et al, 2014). Organizar as atividades de projeto para uma execução fluida e simultânea é um ponto crítico, que indica a necessidade de incluir interfaces organizacionais nos modelos de PDP. Um dos pontos chaves para o desenvolvimento de sistemas mecatrônicos modernos é a integração desde as primeiras atividades e decisões no projeto, como ilustrado na figura 15.

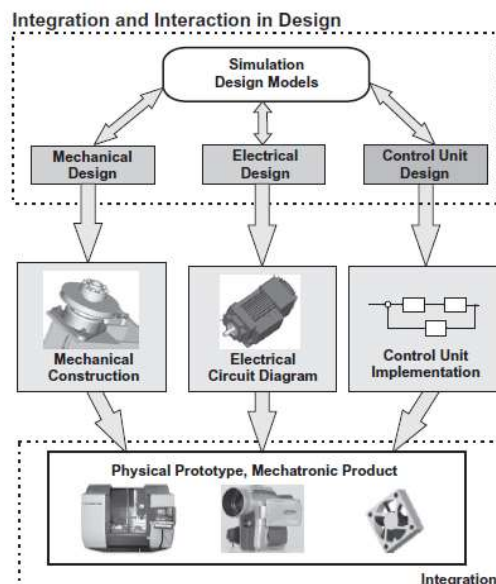


Figura 15 – Integração no projeto de produto mecatrônico (Fonte: Hehenberger et al, 2010)

A interação e integração se inicia com a modelagem e simulação integrada do produto, subprojetos mecânico, elétrico e de controle. Após a análise das interfaces dos módulos específicos, são executados paralelamente a construção mecânica, a elaboração do diagrama elétrico e a implementação da unidade de controle. Integrando os desenvolvimentos anteriores, a realização física de um protótipo é feita sem grandes dificuldades ou empecilhos para conectar as estruturas elétricas, mecânicas e de controle.

Proposto por Hehenberger et al (2010), o Modelo Hierárquico para o desenvolvimento de produtos mecatrônicos consiste em descrever o sistema em módulos mecatrônicos (Figura 16) ou domínios de conhecimento, decompostos em níveis hierárquicos.

Cada domínio é tratado como um projeto conceitual independente e são parametrizados para dimensionar componentes e fornecer especificações técnicas completas.

Uma condição necessária para sucesso do desenvolvimento de um produto mecatrônico é ter uma definição e descrição interdisciplinar do produto. Fenômenos como geometria, cinemática, dinâmica, estabilidade, materiais, eletrodinâmica, controlabilidade e observabilidade, efeitos de saturação e memória devem ser considerados para obter uma representação significativa do sistema. A modelagem auxiliada por computador permite integrar estes aspectos técnicos em diagramas, esquemas, estrutura de dados, fluxogramas, desenhos 3D ou equações.

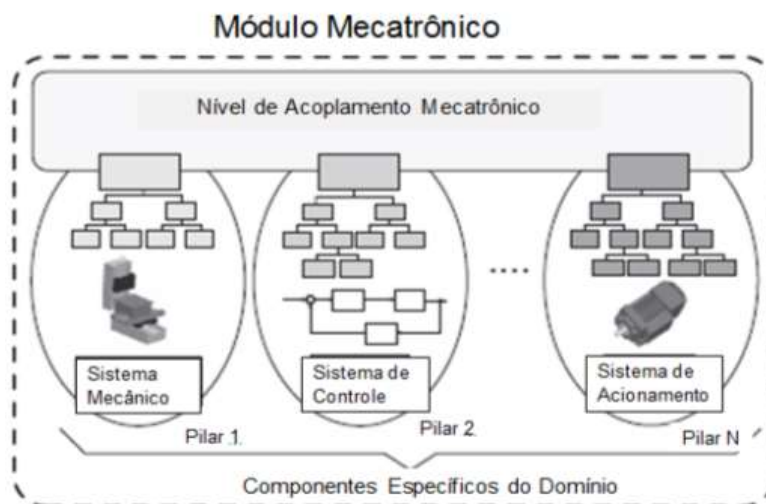


Figura 16 – Módulo mecatrônico (Fonte: Hehenberger, et al, 2010)

O propósito de um modelo de referência é auxiliar e sistematizar um processo. O desenvolvimento de produtos mecatrônicos demanda a utilização de modelos em diversos níveis de sofisticação e abstração. Um modelo genérico, ou de alto nível de abstração, é aplicado inicialmente para documentar o sistema, facilitando a comunicação entre a equipe e o gerenciamento do projeto. Para baixo nível de abstração, o detalhamento técnico requer o uso de modelos específicos e centrados em um domínio de conhecimento, analisando apenas parte de um sistema.

Dessa maneira, o projeto conceitual de um produto mecatrônico inicia-se com modelagem em alto nível de abstração, a fim de mapear o funcionamento total do sistema em questão. A fase conceitual do PDP é dividida em projeto funcional, projeto de princípios de solução e projeto de arquitetura.

O projeto funcional modela um produto técnico por uma função e suas interações e interfaces com meio ambiente, definidas por parâmetros de entrada e saída. Enquanto o projeto de princípios, inicia-se em um alto nível de abstração, onde as propriedades dos

princípios de solução são ainda incertas ou desconhecidas. O que demanda a decomposição do módulo em submódulos para atingir o nível de detalhamento técnico necessário.

4.3 TÉCNICAS E FERRAMENTAS

Nas seções a seguir serão descritas as técnicas e ferramentas a serem utilizadas em no desenvolvimento do projeto.

4.3.1 Conversão de necessidade em requisito de cliente

A principal ferramenta utilizada na conversão das necessidades dos clientes em requisitos do projeto é a matriz QFD (*quality function development*), estruturada nos seguintes processos: definição do problema de projeto, identificação do ciclo de vida do produto, estabelecimento dos requisitos de projeto e a criação da lista de especificações meta.

A figura 17 apresenta as etapas da QFD, numerando-as de acordo com a ordem de execução das atividades. Os requisitos de cliente que compõe a parte 1 da QDF são classificados e hierarquizados através do diagrama de Mudge e gráfico de pareto, indicando a importância de cada um deles na parte 2. O terceiro passo é a realização do *benchmark* competitivo, comparando os requisitos um a um em produtos similares e concorrentes. A parte 4 da QFD consiste em definir os requisitos de produto através da conversão dos requisitos de cliente em expressões mensuráveis. Um requisito de cliente deve gerar pelo menos um requisito de projeto, em alguns casos resultando em 2 ou mais. A matriz de relacionamento entre os requisitos de clientes e de produto, parte 5, resulta no grau de importância de cada requisito de produto. Em seguida, realizou-se o benchmarking técnico (parte 6) para estabelecer valores meta e a matriz de correlação (parte 7) para identificar redundâncias, restrições e outras incoerências nos requisitos de produto.

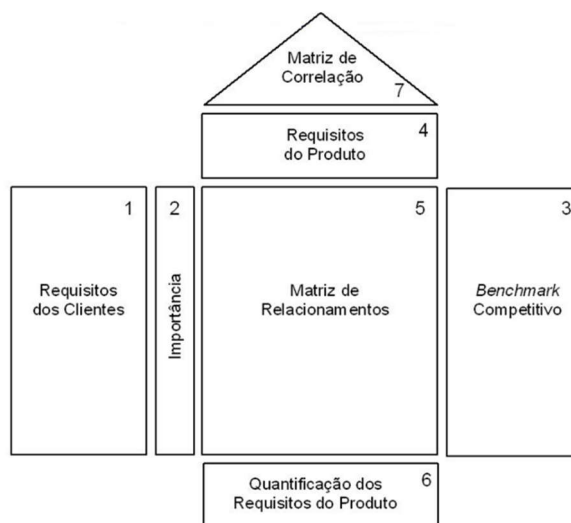


Figura 17 – Casa da qualidade (Fonte: Rozenfeld 2006)

Ao finalizar o desenvolvimento da primeira casa da qualidade, QFD, obtém-se o as especificações-meta de acordo com os valores meta definidos no benchmarking técnico com produtos concorrentes.



Figura 18 – Especificações-meta e as etapas do PDP (Fonte: autora)

As especificações-meta (Figura. 18) são a base para um projeto de desenvolvimento de produto, embasando os critérios de avaliação e tomada de decisão ao longo do projeto. Sendo a saída do projeto informacional, elas representam os requisitos do cliente em termos de requisitos de projeto. Dessa forma, buscando solucionar um problema é possível desenvolver um produto orientado ao cliente a partir das especificações de projeto. Portanto, o sucesso do produto e a satisfação do cliente estão intrinsecamente relacionados a um conjunto de especificações relevantes e coerentes, sendo essas responsáveis por guiar e ou orientar a geração de soluções para conceber o produto.

4.3.2 Métodos de criatividade

A concepção de um produto exige criatividade para geração de soluções alternativas. A fim de atender as especificações-meta e selecionar a melhor e mais inovadora concepção, alguns métodos e procedimentos se mostraram úteis para obter um conjunto de soluções, de maneira rápida e com resultados inovadores, sob o rótulo de processo de criação (Figura 19).

O método da síntese funcional é mais adequado ao desenvolvimento de sistemas técnicos e para informatização do processo de concepção e, portanto, será aplicado para geração de solução neste projeto.

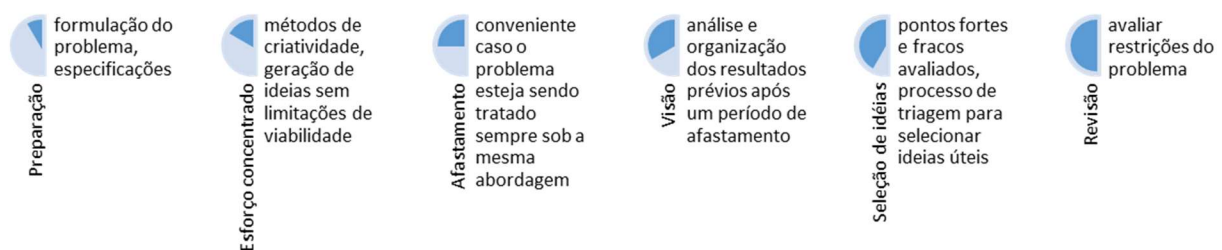


Figura 19 – Processo de criação (Fonte: adaptado de Back et al, 2008)

Durante a etapa de esforço concentrado, prevalece a geração de ideias e soluções aos problemas. Produto, processos e ideias criativas devem ser única, útil, apresentar novidade ou ser apreciada e simples. Diferentes métodos e técnicas foram desenvolvidos para estimular a criatividade nesta etapa, sem limitações de viabilidade técnica ou econômica. Dentre as diferentes classificações na literatura, os métodos de criatividade podem ser intuitivos ou sistemáticos (tabela 3).

Tabela 3 – Métodos intuitivos e sistemáticos de criatividade. (Fonte: Back et al, 2008)

Métodos intuitivos de geração de criatividade	Brainstorming
	Método Delphi
	Analogias direta, simbólica e pessoal
	Método sinético
	Método da listagem de atributos
	Método da instigação de questões
Métodos sistemáticos de geração de criatividade	Método da teoria de solução inventiva de problemas – TRIZ
	Método da análise de valor
	Método da síntese funcional

É de extrema utilidade que a equipe de projeto conheça o processo criativo e esteja ciente das possíveis barreiras desse processo (tabela 4). Na escolha dos métodos de soluções é imprescindível conhecer o potencial de cada membro da equipe, bem como as características de indivíduos criativos. Com frequência, ideias inovadoras e originais partem de pessoas comuns ou não especialistas dentro de uma organização e, portanto, líderes de equipe devem criar e manter um ambiente propício a geração de ideias, mesmo que de início não pareçam adequadas ao problema.

Tabela 4 – Barreiras do processo de criação e suas consequências (Fonte: adaptado de Back et al, 2008)

<i>Definição incorreta do problema</i>	Um problema bem definido e formulado evita incoerências no processo de criação
<i>Hábitos</i>	Conhecimentos e técnicas individuais devem ser avaliados quanto à sua aplicabilidade, evitando que sejam utilizados por força do hábito
<i>Fixação funcional</i>	A concepção não deve se limitar à um único campo de conhecimento, pequenas modificações em um produto podem gerar aplicações em distintos cenários

<i>Superespecialização</i>	A visão holística da arquitetura do produto é fundamental para conceber alternativas de soluções, que não devem se limitar a um campo de especialização
<i>Tendência a tecnologias de ponta</i>	O custo benefício entre a complexidade e eficiência decorrentes de uma tecnologia avançada nem sempre é favorável à adoção de novas tecnologias, ideias simples e intuitivas não devem ser eliminadas
<i>Mentalidade prática</i>	Uma visão ampla do problema e alternativas de solução podem ser ignoradas caso uma solução seja particularizada, tão logo um problema seja exposto
<i>Medo de crítica</i>	O receio de desaprovação e a submissão ao excesso de autoridade podem inibir a criatividade; uma equipe de trabalho deve ter sintonia e confiança para que a geração de ideias seja estimulada
<i>Motivação em excesso</i>	A busca por uma solução perfeita ou ideal pode reduzir a eficácia na solução de problemas, a motivação deve existir para estimular o processo de criação sem pecar pelo excesso ou criar entraves

Durante as fases iniciais de desenvolvimento de um novo produto, o contato com o cliente, bem como a experimentação e validação, deve prevalecer em detrimento de planejamento e execução às cegas. A medida que a interação com o cliente ocorre, são gerados dados e feedback, fatores fundamentais no processo de aprendizagem de qualquer organização.

4.3.3 Síntese funcional e engenharia reversa

A síntese funcional é um dos métodos de geração de concepções mais referenciados na literatura e mais apropriado ao desenvolvimento de sistemas técnicos. A determinação do propósito do sistema técnico em questão é declarada a partir da formulação da função global do sistema (Figura 20); a função global é desdobrada, sucessivamente, em funções elementares ou parciais (Figura 21); são considerados como processos de transformação de estado e das propriedades de grandezas do tipo de energia, material e sinal (BACK, et al, 2008).

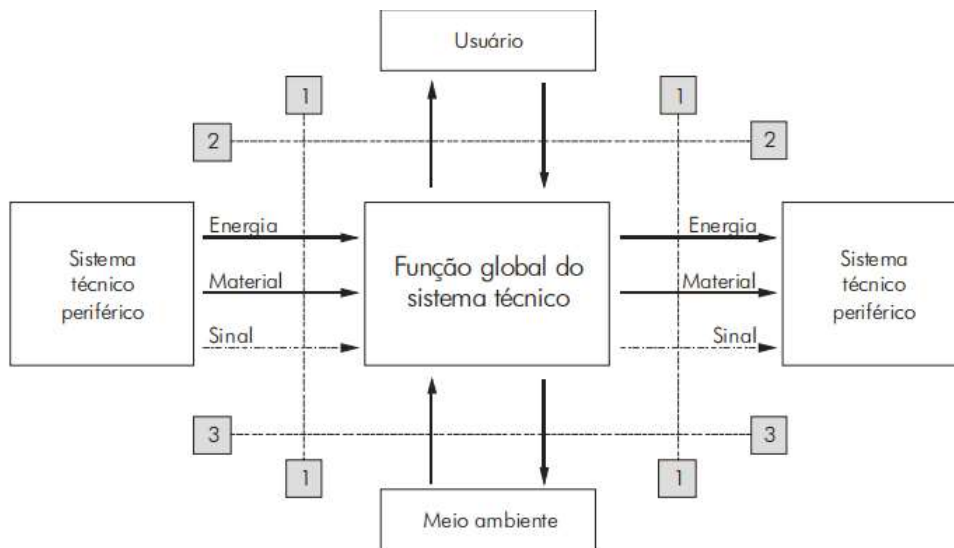


Figura 20 - Formulação da função global do sistema (Fonte: Back et al, 2008)

A decomposição funcional dos sistemas técnicos conta com a experiência de projetistas e demanda analogias com sistemas existentes, utilizando técnica de *brainstorming*, de análise de sistema funcional (FAST), a descrição do processo do sistema pelo método IDEF0 e análise das especificações do projeto.

A engenharia reversa segue o caminho inverso do método da função síntese. Examina o produto físico ou desenho técnico, caracterizando o fluxo funcional entre entrada e saída. Em seguida, descreve o princípio de funcionamento do sistema para determinação da estrutura funcional e, na abstração, chega-se ao nível da função global.

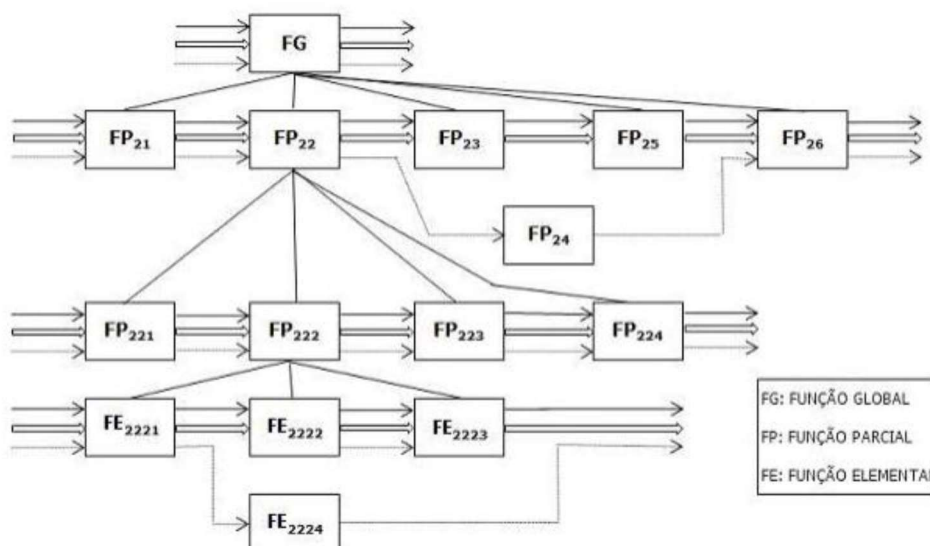


Figura 21 - Desdobramento da função global em funções parciais e elementares (Fonte: Back et al, 2008).

4.3.4 Matriz morfológica

O método de matriz morfológica proporciona a visualização dos conceitos e princípios de solução encontrados facilitando o processo de associação e combinação de princípios, conforme ilustrado na figura 22.

Para cada função elementar, obtidas no desdobramento funcional, são propostos princípios de funcionamento, sem restrição de viabilidade e utilizando métodos de criatividade para otimizar o preenchimento da matriz.

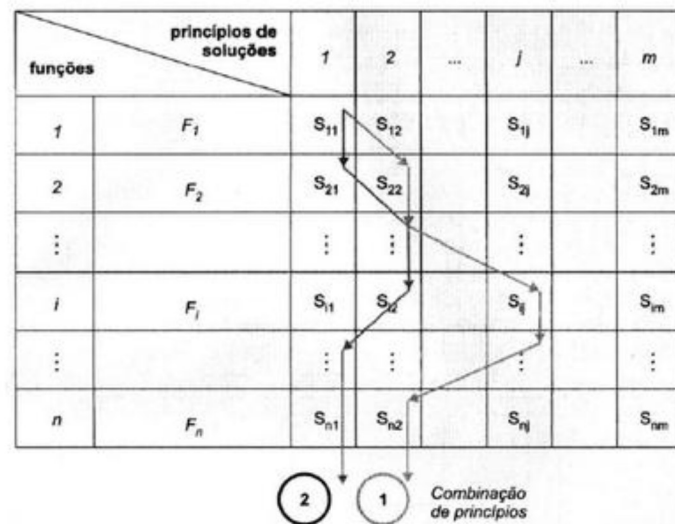


Figura 22 - Matriz Morfológica e a combinação de princípios de solução (Fonte: Rozenfeld, et al. 2006)

Os princípios de solução mapeados para cada função elementar são então combinados para gerar alternativas de concepção. O diagrama de Pugh permite avaliar tais concepções relacionando-as com as necessidades dos clientes e o valor para o consumidor, determinando a concepção mais adequada.

4.3.5 Matriz Indicadora de Módulos (MIM)

A MIM indica quais funções apresentam uma maior tendência a formar módulos e quais devem ser agrupadas para formar um módulo. Segundo Rozenfeld, et al. (2006) “está ferramenta baseia-se em 12 diretrizes relacionadas às razões pelas quais um produto deveria ser modularizado”, na qual essas diretrizes são confrontadas com as funções do produto, atribuindo-lhe valores a cada relacionamento (Figura 23).

Esta técnica representa uma coleção de atividades e outras ações utilizando-se de ICOMs (*Input, Control, Output, Mechanism*), setas e caixas, semelhante a abordagem da síntese funcional. Cada atividade ou função é representada por uma caixa retangular, que pode ser decomposta em quantos níveis e sub-níveis forem necessários.

4.3.7 Estudo de protótipo

O desenvolvimento de produto demanda a realização de protótipos ao longo do seu processo, uma vez que modelos virtuais omitem detalhes da real performance do produto. Protótipos auxiliam no projeto de produto ao permitir a realização física, modelagem e testes funcionais, e simples observação do objeto em 3D. A criação de modelos físicos translada o desenvolvimento de produto do conceito para a forma.

Um modelo físico é um objeto fabricado em escala reduzida com características comportamentais semelhante as do produto em análise. Um modelo físico é comumente referido com protótipo – uma simplificação da concepção do produto. Testes são realizados sob condições restritas, de maneira a avaliar parâmetros específicos, e resultam em dados empíricos utilizados em tomadas de decisão e continuidade do desenvolvimento de produtos com mais confiabilidade e menos riscos de projeto.

Segundo Otto e Wood (2001), protótipos são tipicamente classificados em 6 tipos:

- Modelos de prova de conceito: busca responder questões específicas sobre viabilidade do produto. Fabricado com materiais simples e facilmente disponíveis, focando em um componente ou subsistema do produto. Geralmente construído em paralelo à definição da concepção.
- Protótipo industrial (*mock-up*): demonstra aspectos estéticos do produto e permite representar diferentes conceitos rapidamente. É fisicamente igual ao produto final mas não é funcional.
- Protótipo experimental – DOE: utiliza dados empíricos obtidos anteriormente para parametrizar subsistemas de um modelo mais realista.
- Protótipo alpha: utiliza mesmo material e geometria do produto final, apesar do processo de manufatura não ser o mesmo. Busca responder questões gerais sobre layout. Agrupa os demais subsistemas configurados no protótipo tipo DOE.
- Protótipo beta: primeiro sistema funcional em tamanho real, construído com mesmo material do protótipo final e não necessariamente utilizando o mesmo processo de fabricação.

- Protótipo pré-produção: construído pelos mesmos processos ou ferramentas de manufatura do produto final, é utilizado para avaliar o processo de montagem e produção. Produzido em quantidade estatística válida.

Logo, o estudo de protótipo se inicia com o desenvolvimento de um ou mais modelos de prova de conceito e facilita a seleção da concepção do produto, o planejamento dos protótipos alpha e beta, bem como apresenta uma orientação inicial de fornecedores e componentes.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Enquanto diversos modelos de desenvolvimento de produtos vêm sendo propostos, adequando a evolução tecnológica e complexidade dos produtos, em sua maioria, mecatrônicos, a utilização e integração de um modelo no processo de desenvolvimento de produtos ainda é uma questão crítica. Além de sistematizar o processo, os modelos também auxiliam no gerenciamento de projetos e melhor a colaboração e trabalho em equipe. Diferentemente dos sistemas convencionais, sistemas mecatrônicos são compostos por elevada quantidade de elementos, que integram distintos domínios de conhecimento. A combinação e integração destes domínios aumenta o número de princípios de soluções possíveis e a complexidade do sistema. Um processo em espiral e contínuo, com quantas iterações sejam necessárias, é intrínseco ao desenvolvimento de produtos mecatrônicos, que se inicia em alto nível e é desdobrado até atingir o nível de detalhamento técnico que possibilite a especificação completa do módulo mecatrônico.

Partindo da premissa que o projeto em questão não propõe o desenvolvimento de um novo produto no mercado, a metodologia de engenharia reversa é vista como mais adequada para fomentar o desenvolvimento inicial da estrutura funcional com especificações e restrições, avaliando-se produtos concorrentes.

Entretanto, aplicar o processo completo de engenharia reversa da máquina de impressão 3D para concreto é inviabilizado por não se ter uma máquina concorrente para desmontagem e análise de componentes, identificação de materiais e de projetos para manufatura. Identificou-se como viável e produtivo intercalar os estágios da função síntese e da engenharia reversa, que nada mais é do que o processo inverso do método da síntese funcional.

O dinamismo no processo de desenvolvimento de produtos requer resiliência para se adaptar com eficiência, permitindo a continuidade e sucesso do projeto. Alterações de distintas naturezas podem ocorrer no projeto, requisições das partes interessadas (*stakeholders*), alterações no mercado, amadurecimento ou inovação tecnológicas, além de alterações por necessidades internas.

CAPÍTULO 5 - ESTRUTURA FUNCIONAL

Este capítulo apresenta a estrutura funcional da máquina 3D para concreto, desenvolvida através da síntese funcional associada aos princípios da engenharia reversa. O processo de IDEF0 foi aplicado na alternativa funcional selecionada, desdobrando o sistema da máquina em detalhes (CAD, CAPP e CAM) e apresentando um conteúdo completo e fundamentado para viabilizar a realização do projeto preliminar. O processo, apesar de possuir alto grau de inovação, foi desdobrado a partir da análise comparativa do processo da indústria de pré-fabricados (cap.2) e do processo tradicional de FDM (cap. 3).

Finalmente, conclui-se o desenvolvimento deste trabalho com a definição e seleção da concepção do módulo extrusor da máquina e apresentação do modelo de prova de conceito construído.

5.1 DESDOBRAMENTO FUNCIONAL

Em alto nível de abstração, a funcionalidade da máquina em desenvolvimento é extrudir concreto a partir de um objeto modelado em 3D. Logo, a função global do sistema foi definida como apresentado na figura 25.

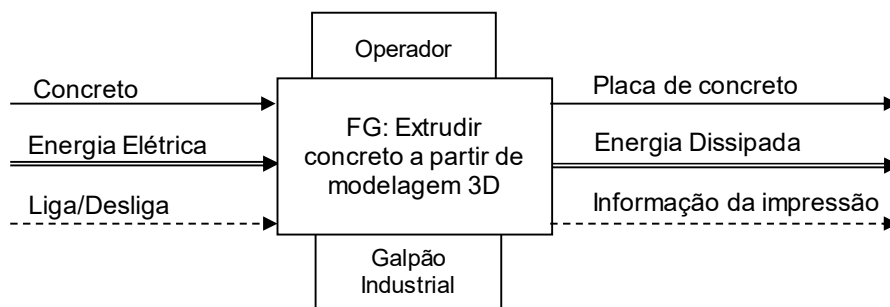


Figura 25 - Função global proposta para o sistema de impressão 3D para concreto (Fonte: autora)

Utilizando-se métodos de criatividade, brainstorming com a equipe da InovaHouse3D e profissionais de engenharia de produção; analogias e listagem de atributos, elaborou-se 3 alternativas funcionais (Tab. 5 a 7) para a função global definida. A representação gráfica dessas alternativas está apresentada nas figuras 26 a 29.

Tabela 5 - Alternativa funcional 1 (Fonte: autora)

Alternativa 1	
Funções Parciais	Funções Elementares
FP1: Preparar máquina para extrusão	FE1: Posicionar o bico extrusor no ponto inicial do processo
	FE2: Ler modelagem 3D da estrutura a ser construída
	FE3: Gerar trajeto de extrusão do concreto
	FE4: Salvar trajeto no banco de dados
FP2: Conduzir material ao bico	FE5: Acionar injeção de material na máquina
	FE6: Movimentar concreto
	FE7: Configurar viscosidade do material
	FE8: Informar o operador quando o bico estiver pronto para extrudir
FP3: Extrudir material no trajeto definido	FE9: Executar G-Code para produzir a placa de concreto
	F10: Movimentar bico extrusor no plano XY
	F11: Movimentar bico extrusor no plano Z
	F12: Salvar os dados da impressão
FP4: Notificar operador com informações da impressão	FE13: Informar operador quando o processo finalizar
	FE14: Exibir os dados da impressão

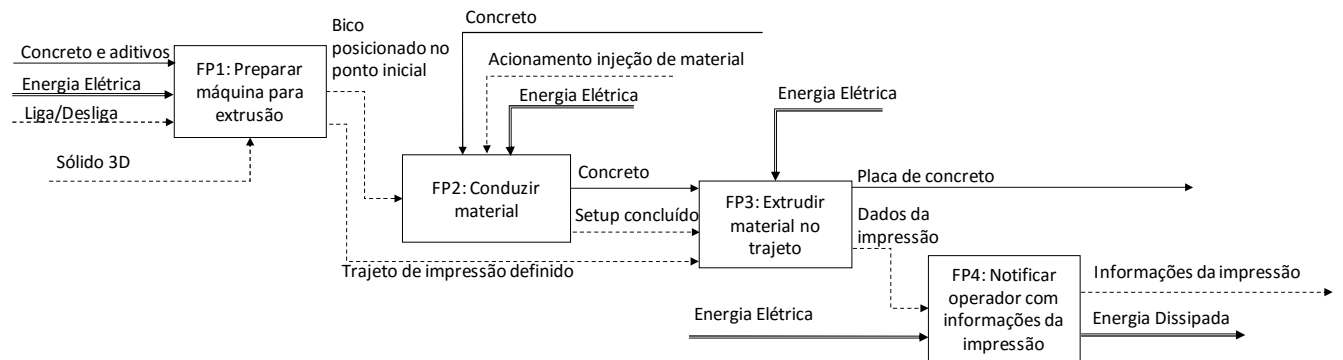


Figura 26 - Funções parciais alternativa 1 (Fonte: autora)

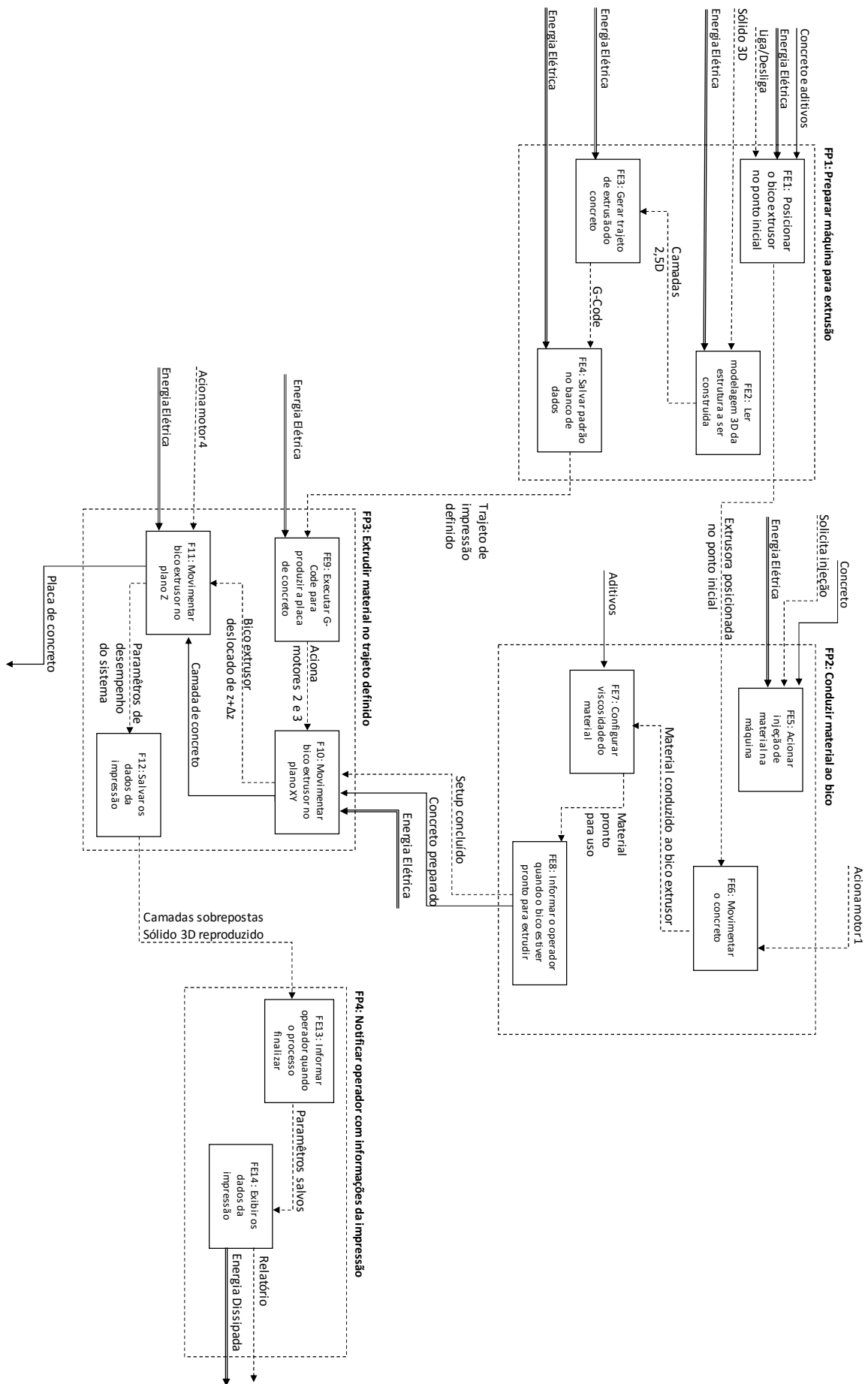


Figura 27 - Funções elementares da alternativa 1 (Fonte: autora)

Tabela 6 – Alternativa funcional 2 (Fonte: autora)

Alternativa 2	
Funções Parciais	Funções Elementares
FP1: Preparar trajeto para extrusão	FE1: Selecionar sólido 3D
	FE2: Gerar trajeto de extrusão do concreto
	FE3: Salvar trajeto planejado no banco de dados
FP2: Fazer o setpoint do sistema	FE4: Configurar viscosidade do material
	FE5: Escolher ponto de início do bico extrusor
	FE6: Solicitar autorização do operador para inicializar o processo
	FE7: Salvar definições no banco de dados
FP3: Extrudir material no trajeto definido	FE8: Executar G-Code para produzir a placa de concreto
	F9: Movimentar bico extrusor no plano XY
	F10: Solicitar autorização do operador para executar a próxima camada
	F11: Movimentar bico extrusor no plano Z
	F12: Salvar informações da impressão
FP4: Finalizar impressão	FE13: Desligar o sistema quando o processo finalizar
	FE14: Gerar relatório da impressão

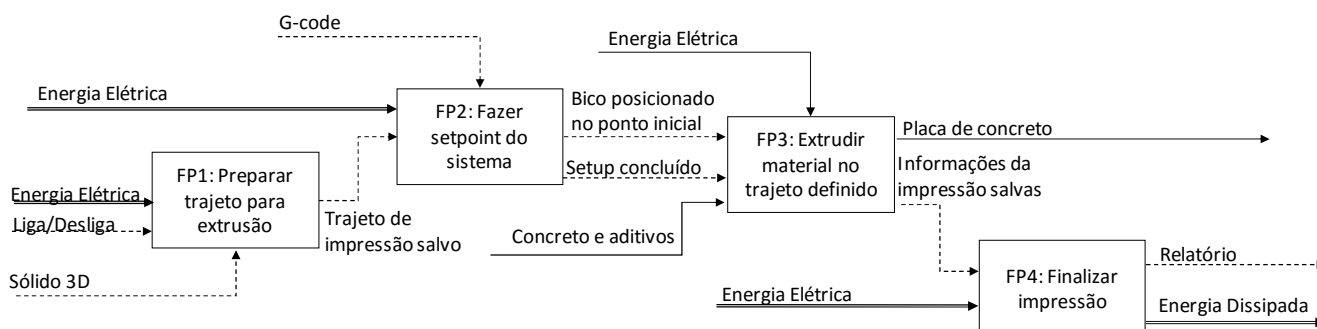


Figura 28 - funções parciais alternativa 2 (Fonte: autora)

Tabela 7 – Alternativa funcional 3 (Fonte: autora)

Alternativa 3	
Funções Parciais	Funções Elementares
FP2: Fazer o setpoint do sistema	FE1: Definir viscosidade do material
	FE2: Selecionar sólido 3D
	FE3: Gerar trajeto de extrusão do concreto
	FE4: Escolher ponto de início do bico extrusor
	FE5: Salvar definições no banco de dados
FP3: Extrudir material	FE6: Acionar injeção de material na máquina
	FE7: Movimentar concreto da bomba ao bico
	FE8: Medir a viscosidade do material no bico
FP3: Movimentar máquina pelo trajeto definido	FE9: Salvar dados do material
	FE10: Executar G-Code para produzir a placa de concreto
	F11: Movimentar bico extrusor no plano XY
	F12: Solicitar autorização do operador para executar a próxima camada
FP4: Finalizar impressão	F13: Movimentar bico extrusor no plano Z
	F14: Salvar informações da impressão
	FE15: Desligar o sistema quando o processo finalizar
	FE16: Gerar relatório da impressão

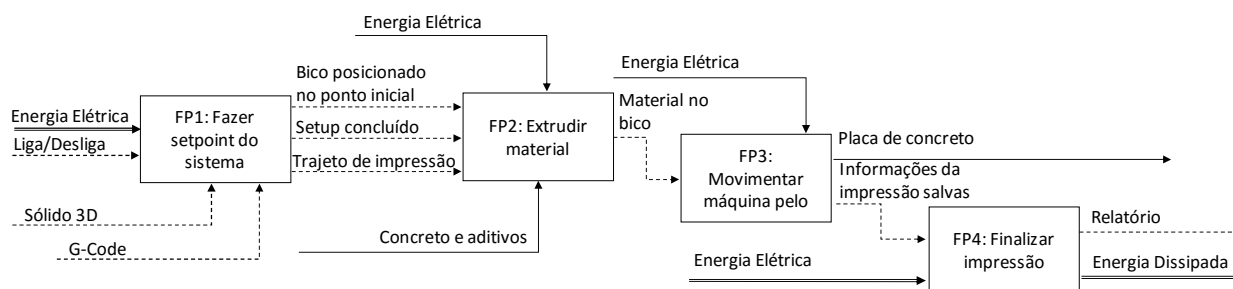


Figura 29 - Funções parciais alternativa 3 (Fonte: autora)

As alternativas funcionais foram avaliadas (Tab. 8) em relação as necessidades e requisitos de clientes levantados em conjunto com o projeto da disciplina de PSP6¹ (Anexo 1). Dentre 38 requisitos levantados, foram selecionados aqueles que envolvem funcionalidade da máquina para compor os critérios de avaliação. A alternativa 1 foi utilizada como referencial comparativo no processo de avaliação. Quando outra alternativa é considerada melhor, em relação a 1, para determinado requisito tem-se '+' e quando é pior tem-se '-'. Dessa análise, concluiu-se que a alternativa 1 é mais adequada e, portanto, suas funções parciais (Fig. 26) e elementares (Fig. 27) estão representadas com suas respectivas entradas e saídas.

Tabela 8 - Avaliação das alternativas funcionais (Fonte: autora)

Critérios de avaliação	Peso	Referência	Alternativa 2	Alternativa 3
		Alternativa 1		
Ter baixo tempo de impressão	5	0	-	-
Ter interface com o usuário simples	5	0	0	0
Ter velocidade constante de extrusão(consumo de concreto)	5	0	0	0
Ter baixo custo de operação	5	0	0	0
Ter fluxo de extrusão constante	5	0	0	0
Ter baixo índice de retrabalho	5	0	0	+
Ter baixo consumo de energia	4	0	0	0
Ter alto grau de automatização	4	0	-	-
Ter baixo tempo de desmontagem	4	0	0	0
Ter baixo custo de manutenção	4	0	-	-
Ser capaz de extrudir concreto em diferentes formulações	2	0	0	+
Ter pouca geração de resíduos	1	0	0	0
Soma positiva			0	2
Soma negativa			3	3
Total			-13	-6

¹ Disciplina de PSP6: Disciplina do curso de Graduação de Engenharia de Produção do nono semestre, com a abordagem de Ensino por projeto, com o co-requisito da disciplina de Engenharia de Produto. Formada por uma equipe de 5 alunos, no qual é apresentado um problema real, para ser desenvolvido as especificações, o conceito e a viabilidade econômica do projeto

As alternativas 2 e 3, requerem mais interações com o operador pois, a cada execução das funções parciais, o operador precisa autorizar a continuidade do processo. Com isso, a alternativa 1 tem maior grau de automatização e menor tempo de impressão. Entretanto, as outras alternativas oferecem um maior controle de qualidade do produto final e, em contrapartida, necessitam de um sistema de monitoramento mais complexo, aumentando o custo do processo. Considerando estes aspectos, a alternativa 1 foi selecionada como mais apropriada para o desenvolvimento deste projeto.

5.2 IDEF0

Além dos princípios da RepRap e do processo de produção de elementos pré-fabricados, considerou-se também o sistema 3D para impressão de concreto (ver 2.3) do projeto *Rudenko's 3D Printer* ao longo da modelagem do sistema.

O modelo IDEF0 definido possui 3 atividades principais (A1, A2 e A3), decompostas até o menor nível de abstração possível, limitados pelo conhecimento das autoras. A atividade A0 (Fig. 30) apresenta a visão geral do sistema de impressão 3D de placas de concreto, indicando todas as entradas, mecanismos e controle envolvidos no processo para gerar as respectivas saídas.

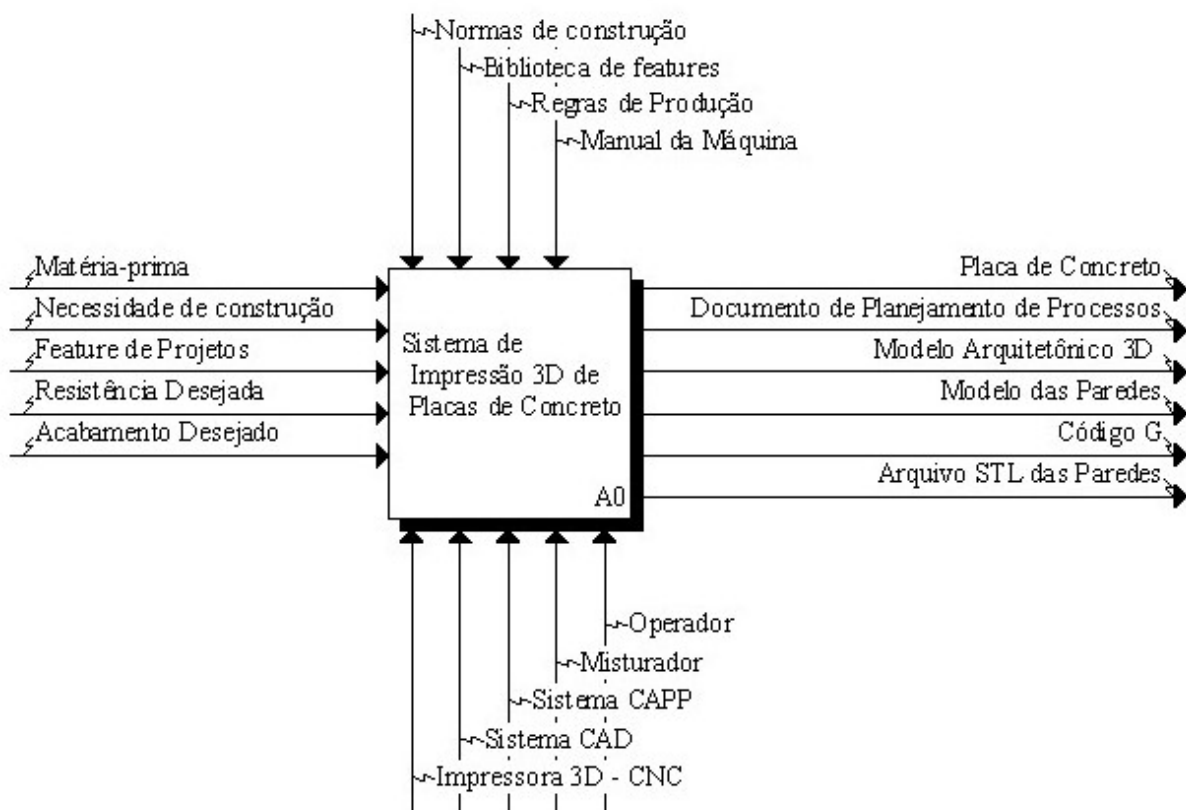


Figura 30 - Nível global do Sistema de Impressão 3D de placas de concreto- A0 (Fonte: autora)

A Figura 31 apresenta a divisão do sistema de impressão em três camadas associadas a cada uma das fases do CIM: A1: Projeto das Paredes – CAD; A2: Planejamento de Processos – CAPP; A3: Operação – CAM.

A Manufatura Integrada por Computador (CIM) consiste na integração de todos os aspectos da manufatura, ou seja, os módulos CAD, CAPP e CAM. A principal função do CAD é definir com precisão a geometria do projeto que se deseja construir. Já o CAPP é responsável pela ligação das informações de projeto fornecidas pelo CAD e que serão utilizadas pelo CAM. Este último referindo-se à aplicação computacional para fabricação.

O objetivo da integração de sistemas CAD/CAPP/CAM é traduzir o conhecimento de cada um dos estágios para criar uma infraestrutura comum. No caso do sistema de impressão 3D, a impressora está baseada em um modelo orientado a objetos para CNCs. Para isso, a programação é baseada em *features* que serão impressas, nas operações a serem realizadas (*Workingsteps*) e no plano de processo (*Workplan*).

Em se tratando dos padrões existentes, a ISO 6983 especifica requisitos e faz recomendações para o formato dos dados de posicionamento, para o movimento linear e para o sistema de controle de contorno usados no controle numérico de máquinas. Portanto, é possível afirmar que este padrão ajuda na coordenação do projeto do sistema para minimizar a variedade de programas necessários, para que a programação seja uniforme e para que seja possível a entrada de diferentes programas de outras máquinas de comando numérico.

As *features* são utilizadas em projetos para descreverem um modelo de produtos de forma mais inteligente quando comparada à geometria explícita representando, ao final, o significado de engenharia numa peça. Por meio das *features* é possível criar uma estrutura de dados para representar uma peça ou uma montagem em termos de seus componentes.

As atividades de CAD, CAPP e CAM envolvidas no processo de impressão 3D para concreto foram modelados através da metodologia de IDEF0 e serão detalhados nas seções seguintes.

Ainda da Figura 31 é possível visualizar que a primeira atividade do sistema deve receber as informações que caracterizem a construção: qual é a necessidade ou especificidades do projeto, como deve ser o acabamento e qual é a resistência desejada final do concreto. Dessa maneira, irá entregar para a fase seguinte o Modelo das Paredes com todas estas informações processadas.

Na segunda etapa, que é o Planejamento de Processos, deverão ser entrada as informações já mencionadas, além das *features* de projeto. Com isso, a saída será o *workplan*, o código G e o documento de Planejamento de Processos.

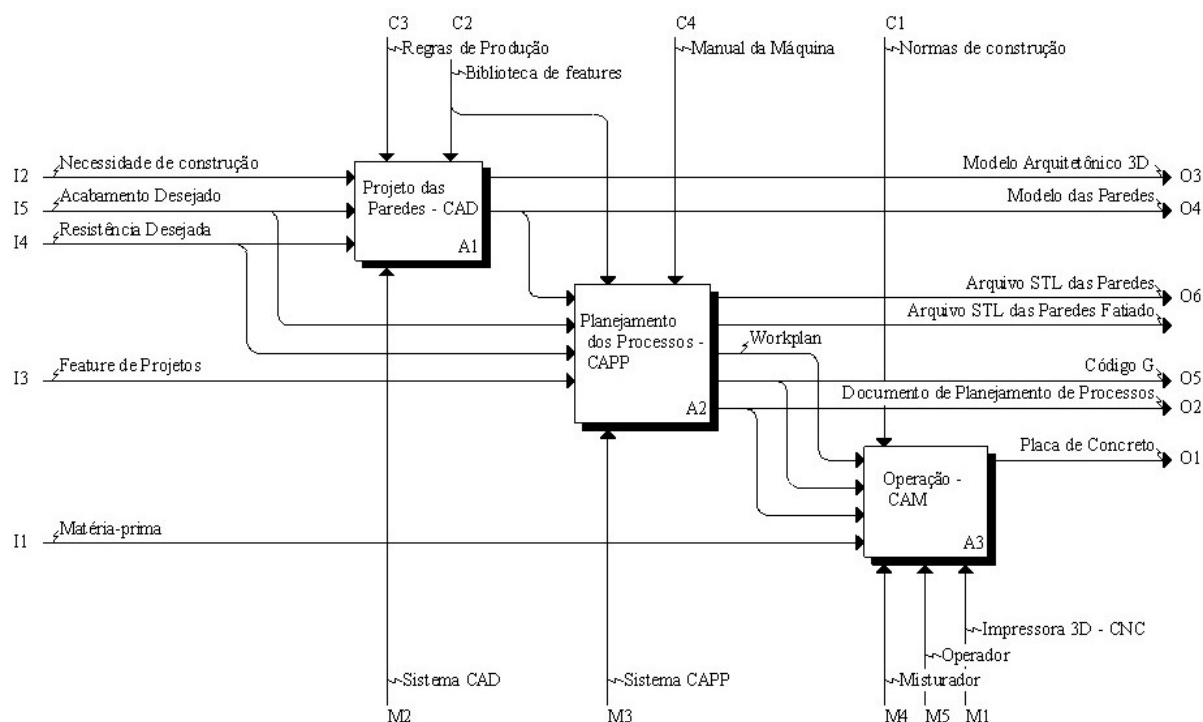


Figura 31 – Desdobramento do sistema global nos níveis A1, A2 e A3 (Fonte: autora)

A atividade de Operação, terceira e última do sistema, receberá tudo o que foi produzido até então de documentos e informações para de fato operar a máquina e produzir a Placa de Concreto. Observa-se da figura 31 que a matéria prima utilizada também deve ser uma entrada nesta atividade.

Nas seções seguintes, cada uma destas três atividades será detalhada e serão apresentados seus respectivos diagramas IDEF0.

5.2.1 Projeto das paredes CAD

O Projeto das Paredes que serão construídas se inicia com o Modelo Arquitetônico da residência e termina com as *features* já identificadas. Por esta razão que esta etapa foi dividida entre: criação do modelo arquitetônico e reconhecimento de *features*.

A Figura 32 mostra as duas atividades (A11 e A12). A primeira delas prevê exatamente a especificação das características da construção, como tamanho, espessura e altura das paredes. Utilizando um sistema de CAD comercial é possível fazer o desenho da residência em formato 3D. A Figura 33 mostra com maior detalhamento o que deve ser realizado para que a saída ocorra.

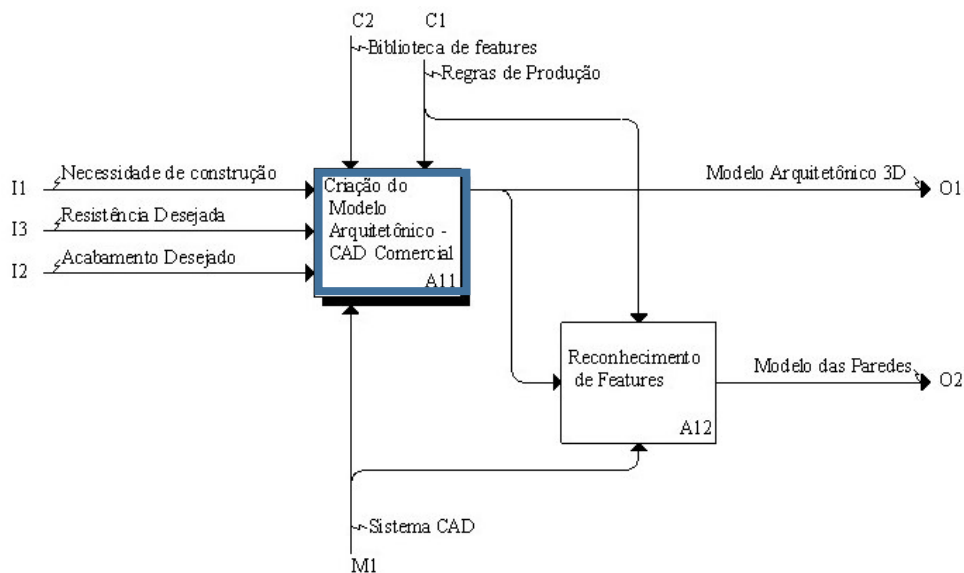


Figura 32 - Nível A2 da atividade A1: Projeto das Paredes – CAD (Fonte: autora)

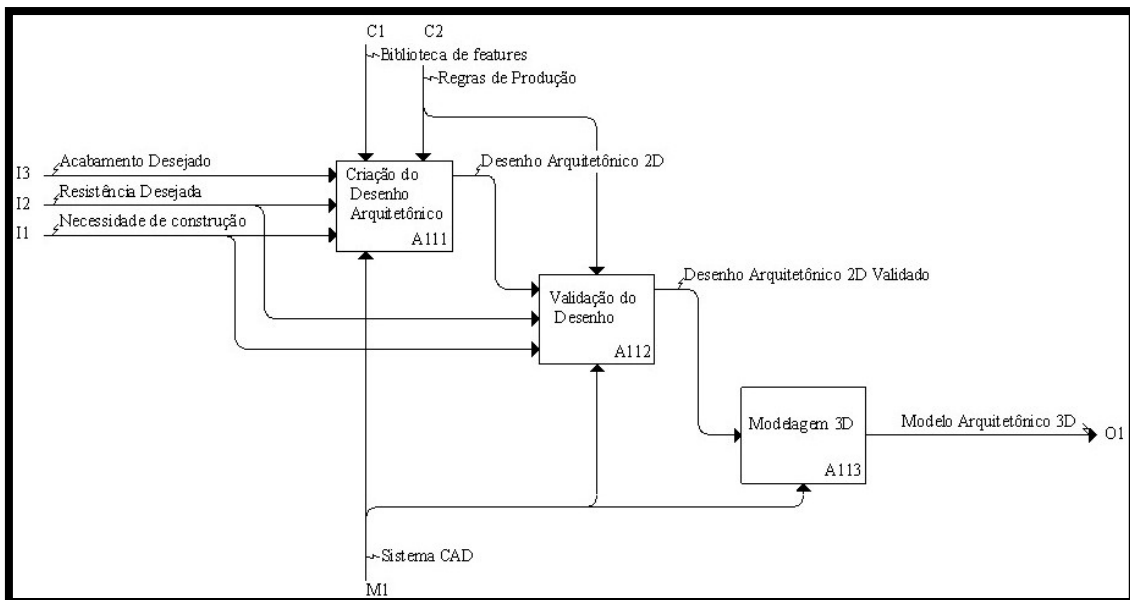


Figura 33 – Nível A3 da atividade A11: Criação de Modelo Arquitetônico (Fonte: autora)

A segunda atividade do Projeto das Paredes está relacionada às *features* que servirão de informação para as próximas atividades do sistema. Dessa forma, com a entrada do Modelo Arquitetônico em 3D, o Sistema CAD irá identificar as paredes existentes no modelo e numera-las como *features*.

Na Figura 34 foi feito um esquema que exemplificasse como o reconhecimento das *features* deve ocorrer: diretamente do arquivo do CAD comercial, o sistema identifica quais são as paredes do modelo e as enumera conforme *features* (p1 até pn). O arquivo chamado Modelo das Paredes é resultado dessa atividade e, conseqüentemente, é entrada para a primeira atividade do módulo CAPP.

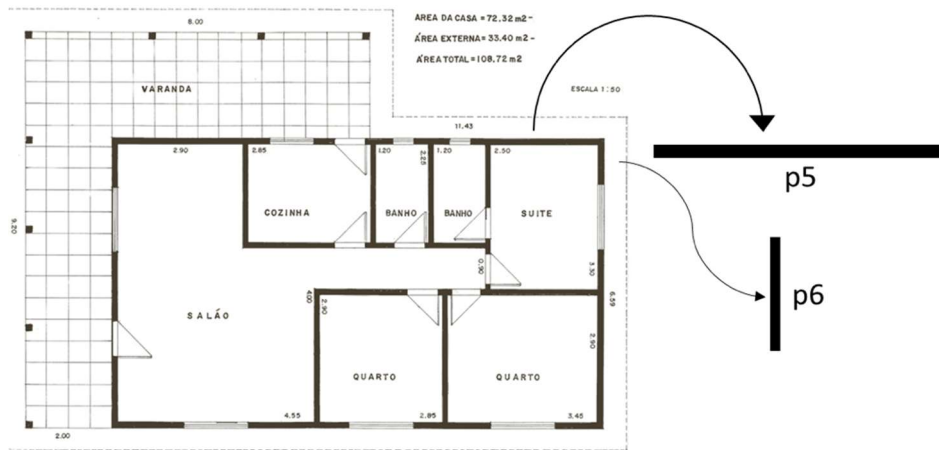


Figura 34 – Reconhecimento de features (Fonte: autora)

5.2.2 Planejamento dos Processos – CAPP

Nesta etapa, a preparação das *features*, definição de operações e otimização do processo são identificadas (Fig. 35). Considerando que a impressora 3D opera como uma máquina CNC, o Código G informa as direções que o bico da extrusora deve percorrer e é saída do processo CAPP.

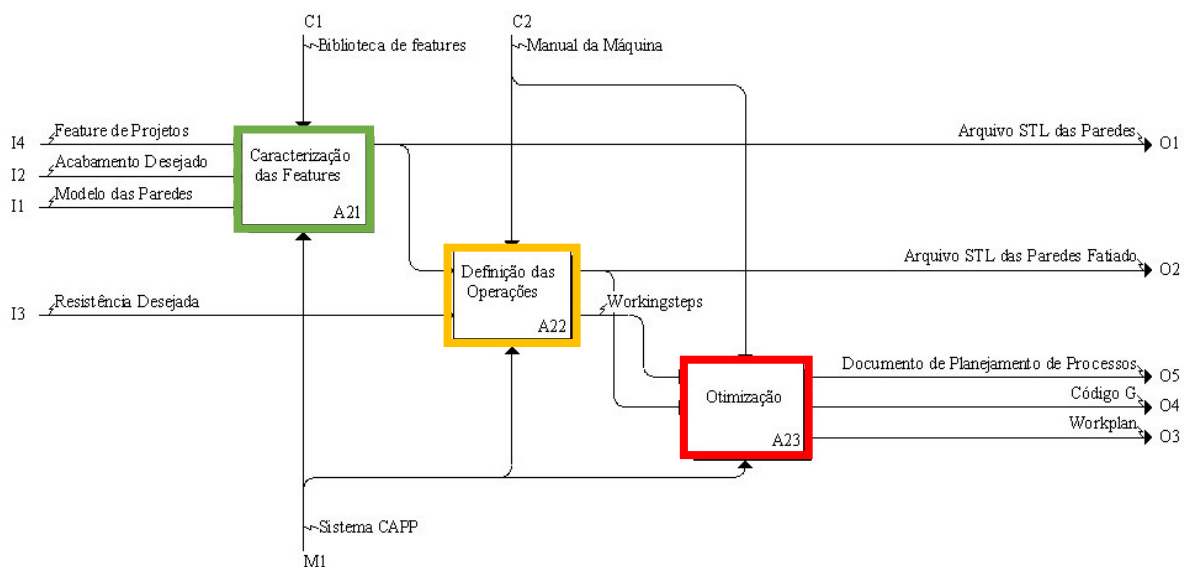


Figura 35 - Nível A2 da atividade A2: Planejamento dos Processos (Fonte: autora)

As Figuras 36, 37 e 38 irão detalhar as entradas, saídas, controles e mecanismos cada uma das atividades do Planejamento de Processos. É importante que ressaltar que o objetivo final dessas atividades é realmente preparar a produção contando que o próximo passo é a execução da construção.

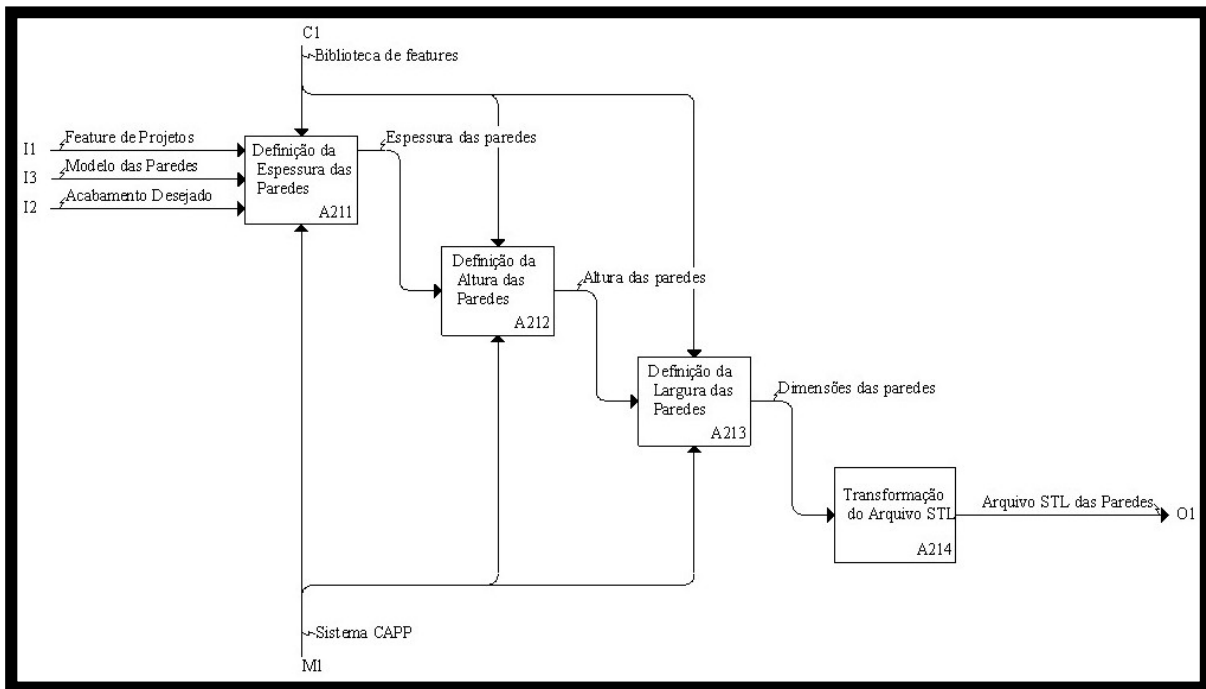


Figura 36 - Nível A3 da atividade A21: Caracterização das Features (Fonte: autora)

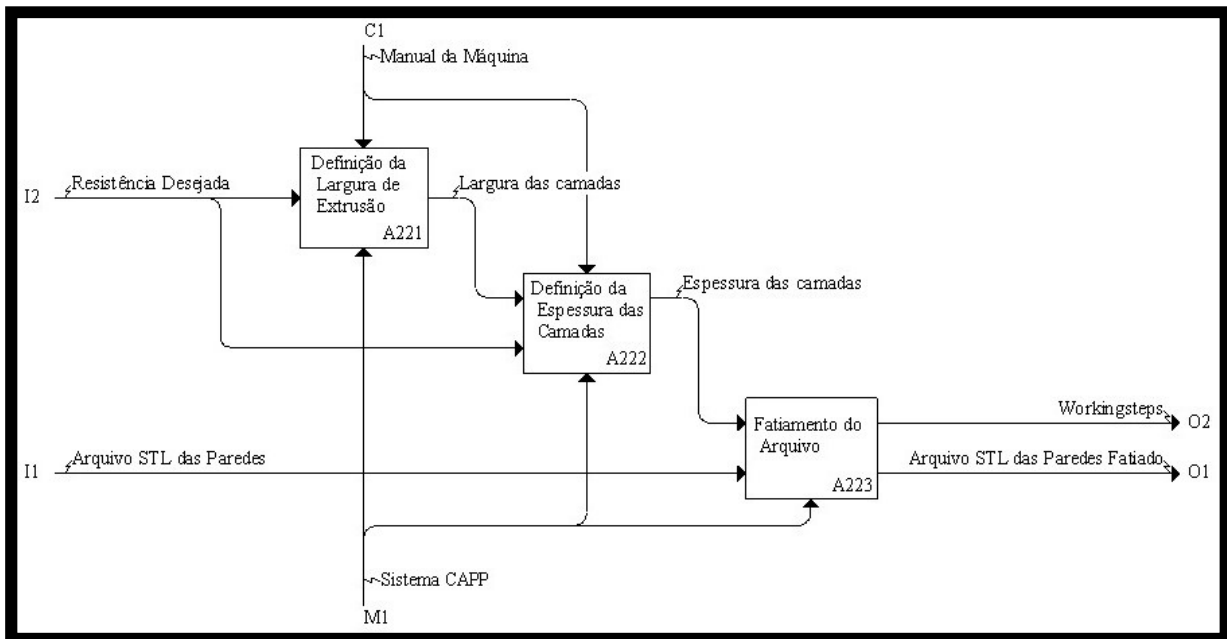


Figura 37 - Nível A3 da atividade A22: Definição das Operações (Fonte: autora)

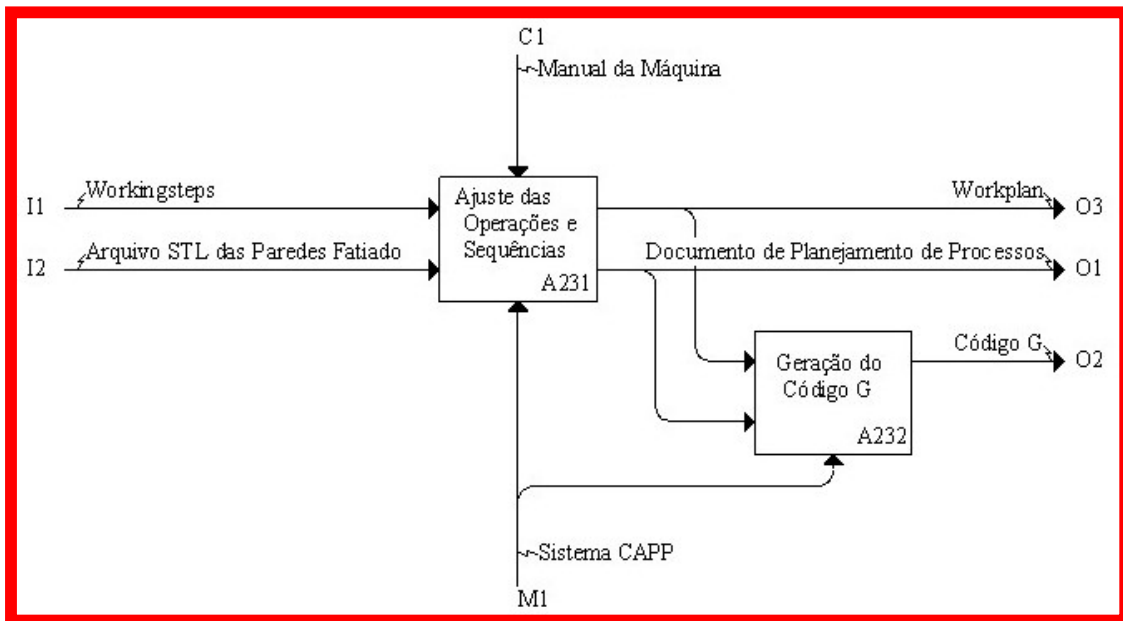


Figura 38 - Nível A3 da atividade A23: Otimização (Fonte: autora)

5.2.3 Operação – CAM

O sistema CAM concentra as informações mais relevantes para o desenvolvimento e operação da máquina.

A última atividade do sistema de impressão diz respeito à operação da máquina e, conseqüentemente, a construção das paredes. Conforme pode ser visto na Figura 39, essa etapa foi dividida em três atividades: a preparação dos insumos, a preparação da máquina e a execução das paredes.

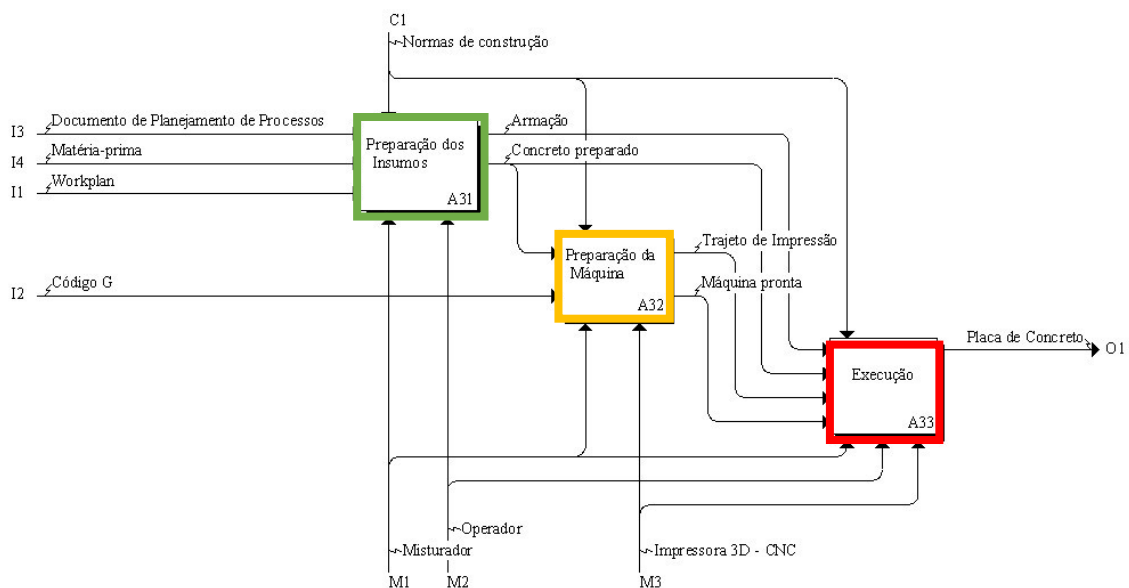


Figura 39 - Nível A2 da atividade A3: Operação (Fonte: autora)

A primeira atividade que está relacionada aos insumos tem dois objetivos principais. O primeiro deles é a mistura do concreto. No caso da utilização do concreto em impressões 3D a mistura deve receber alguns aditivos que garantam a resistência e o tempo de cura ideais para o processo/ produto desejado. Dessa forma, na etapa anterior de Planejamento de Processos essas decisões já foram feitas, neste momento (atividade A311) deve-se seguir o estipulado no Documento de Planejamento de Processos.

A segunda atividade apresentada na Figura 40 é responsável por preparar a armação necessária à construção. Essa preparação também depende do Planejamento de Processos podendo variar entre um aramado mais estruturado até a inserção de fibra de vidro na composição da matéria-prima.

As normas de construção são utilizadas como ações de controle ao longo de todo processo de produção. Em A31, normas de concentração de aditivos e regulamentações para armadura, por exemplo, devem ser consideradas. Em A32 e A33 é pertinente avaliar normas que indicam o tempo de utilização do concreto após a mistura de água.

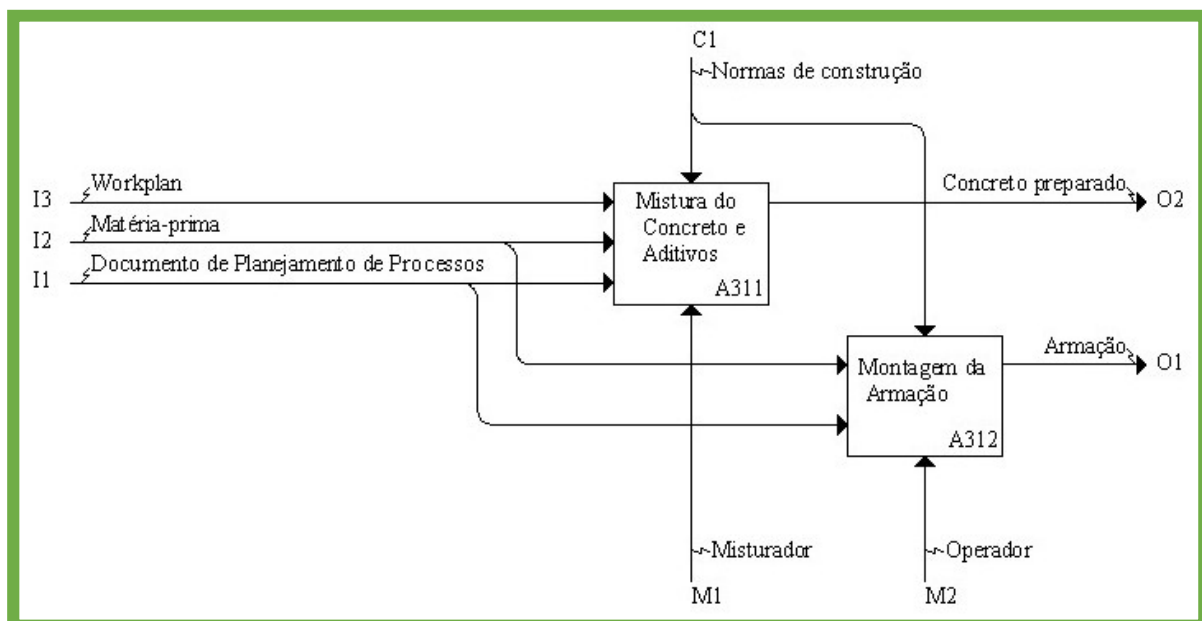


Figura 40 – Nível A3 da atividade A31: Preparação dos Insumos (Fonte: autora)

A segunda atividade da Operação está relacionada à máquina e deve garantir que todos os seus componentes estão funcionando corretamente e estão de acordo com o Planejamento de Processos. É neste momento que o controlador é configurado conforme o projeto que será construído figura 41.

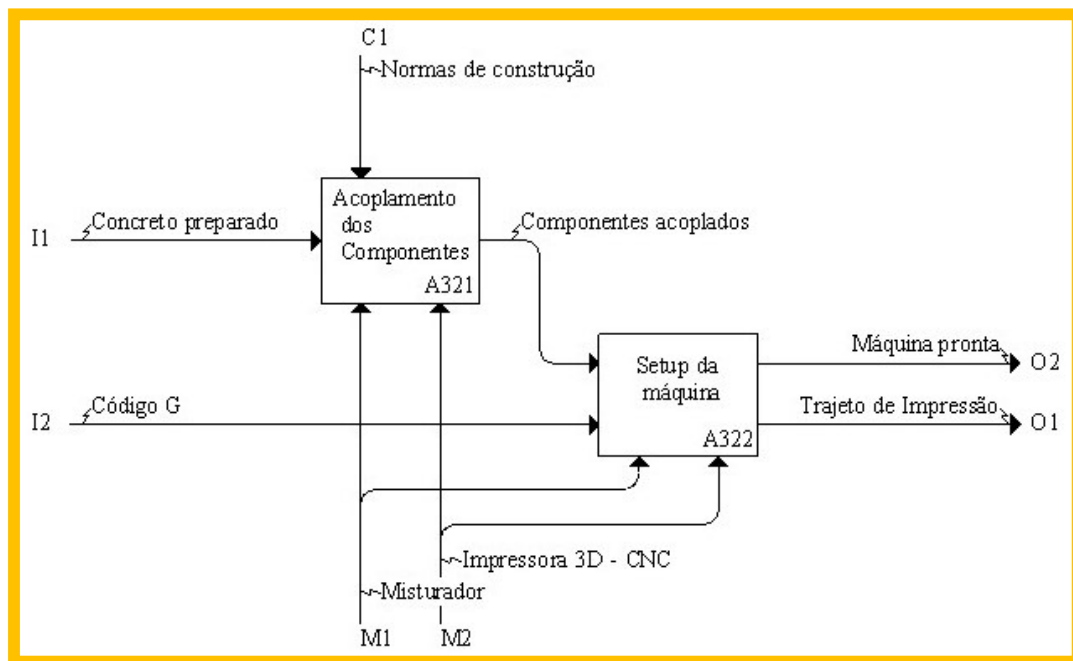


Figura 41 - Nível A3 da atividade A32: Preparação da Máquina (Fonte: autora)

A última fase é de execução do que foi planejado ao longo do sistema. Ele deverá ser operado seguindo as instruções do Planejamento de Processos e utilizando os materiais que foram exclusivamente preparados para aquela construção. É possível observar na Figura 42 que são três passos: a condução do material do misturador através da bomba até o bico extrusor; o posicionamento da armação que a cada conjunto de camadas deve ser reposicionado conforme o planejado e a extrusão da mistura de concreto e aditivos.

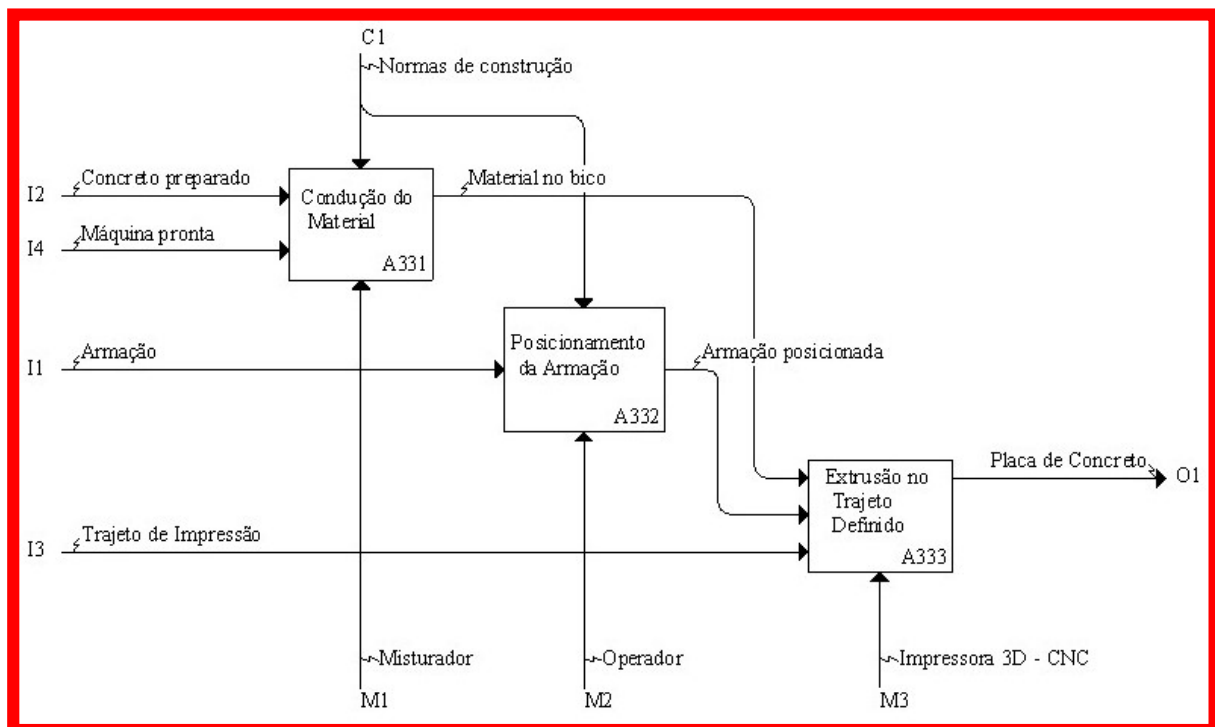



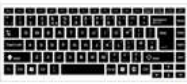








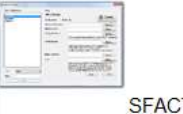















Figura 42 - Nível A3 da atividade A33: Execução (Fonte: autora)

5.3 MATRIZ MORFOLÓGICA

Para cada uma das 14 funções elementares definidas foram mapeados pelo menos 3 princípios de solução, indicados na matriz morfológica (Figura. 43). Estes princípios foram mapeados através de pesquisa e estudos empíricos sobre o processo tradicional de FFF, especificamente o projeto RepRap, e dos equipamentos utilizados na indústria de pré-fabricados verificados em visita técnica à TECRON (Anexo 2).

Um dos equipamentos identificados na visita foi a máquina Extruder EX203 – WCH Equipamentos, equipamento de alta produtividade, aplicado na produção de elementos pré-fabricados protendidos. A funcionalidade da máquina assemelha-se a uma máquina de extrusão roboticamente guiada e, portanto, também foi considerada no processo morfológico.

Apesar de possuir alto grau de inovação na indústria de construção civil, a proposta de máquina deste projeto é composta por subsistemas e componentes tecnologicamente maduros e bem estabelecidos.

Funções Elementares	Princípio de solução 1	Princípio de solução 2	Princípio de solução 3	Princípio de solução 4	Princípio de solução 5
FE1: Posicionar o bico extrusor no ponto inicial do processo	 mouse	 teclado	 touch	 comando de voz	 manual
FE2: Ler modelagem 3D da estrutura a ser construída	 mouse	 teclado	 touch	 comando de voz	
FE3: Gerar trajeto de extrusão do concreto	 Slicer	 SFACT	 Skeinforge		
FE4: Salvar trajeto no banco de dados	 memória local	 nuvem	 servidor	 memória externa	
FE5: Acionar injeção de material na máquina	 mouse	 teclado	 touch	 comando de voz	 manual
FE6: Movimentar concreto	 rosca helicoidal e motor	 bomba reboque	 gravidade	 caçamba dosadora	 bomba lança










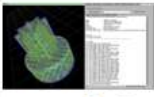
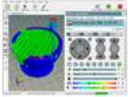




















FE7: Configurar viscosidade do material	 touch	 manual	 mouse	 teclado	 comando de voz
FE8: Informar o operador quando o bico estiver pronto para extrudir	 som	 dashboard	 relatório		
FE9: Executar G-Code para produzir a placa de concreto	 Replicator G	 RepSnapper	 Repetier		
F10: Movimentar bico extrusor no plano XY	 motor de passo	 servo motor	 motor DC	 braço robótico	 robô delta
F11: Movimentar bico extrusor no plano Z	 motor de portão	 cremalheira e pinhão	 braço robótico	 robô delta	 motor indução
F12: Salvar os dados da impressão	 memória local	 nuvem	 servidor	 memória externa	
FE13: Informar operador quando o processo finalizar	 som	 dashboard	 relatório		
FE14: Exibir os dados da impressão	 tela	 papel	 dispositivo móvel		

Figura 43 – Matriz Morfológica (Fonte: autora)

As alternativas de concepção da máquina são geradas a partir da combinação dos princípios mapeados, avaliando-se compatibilidade técnica, viabilidade de integração bem como a melhor relação custo benefício. Procurou-se combinar os princípios de modo a criar uma solução altamente tecnológicas e futurísticas (solução 1), outra baseada em processos automatizados da indústria automobilística (solução 2) e, finalmente, uma solução simplificada e com menor grau de automatização (solução 3), conforme apresentado na tabela 9. Com caráter ilustrativo, as alternativas de solução são aproximadas por projetos existentes e apresentas nas figuras 44, 45 e 46.

Tabela 9 - combinação dos princípios de solução da matriz morfológica (Fonte: autora)

Funções Elementares	SOLUÇÃO 1	SOLUÇÃO 2	SOLUÇÃO 3
FE1: Posicionar o bico extrusor no ponto inicial do processo	Touch	Mouse	Manual
FE2: Ler modelagem 3D da estrutura a ser construída	Touch	Mouse	Mouse

FE3: Gerar trajeto de extrusão do concreto	Slicer	Slicer	Slicer
FE4: Salvar trajeto no banco de dados	Nuvem	Memória local	Memória local
FE5: Acionar injeção de material na máquina	Touch	Mouse	Manual
FE6: Movimentar concreto	Bomba lança	Bomba reboque	Gravidade
FE7: Configurar viscosidade do material	Teclado	Teclado	Manual
FE8: Informar o operador quando o bico estiver pronto para extrudir	Som	Som	Dashboard
FE9: Executar G-Code para produzir a placa de concreto	Repetier	Repetier	Replicator G
F10: Movimentar bico extrusor no plano XY	Robô delta	Braço robótico	Motor DC
F11: Movimentar bico extrusor no plano Z	Robô delta	Braço robótico	Cremalheira e pinhão
F12: Salvar os dados da impressão	Nuvem	Memória local	Memória local
FE13: Informar operador quando o processo finalizar	Som	Dashboard	Dashboard
FE14: Exibir os dados da impressão	Dispositivo móvel	Tela	Tela

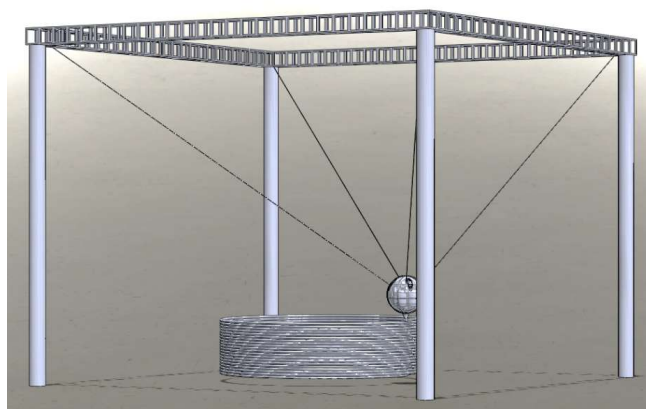


Figura 44 - Esboço da solução 1 (Fonte: SpiderBot)



Figura 45 - Esboço da solução 2 (Fonte: Apis)



Figura 46- Esboço da solução 3 (Fonte: FarmBot).

Utilizando como critério de avaliação o requisito de custo de fabricação, devido às limitações financeiras do projeto, selecionou-se a alternativa de solução 3 da como a concepção mais adequada ao cenário deste trabalho.

5.4 MODULARIDADE DA MÁQUINA

Os princípios de solução da matriz morfológica da máquina a ser construída, são muitas vezes agrupados em subsistemas ou módulos dentro do funcionamento global da máquina, sendo pertinente agrupar as funções elementares indicando possível modularidade da máquina.

Em análise preliminar, percebe-se que as funções 1, 2, 3, 9, 10 e 11 podem ser combinadas em um sistema de controle e posicionamento. Já as funções 5, 6 e 7 podem ser combinadas em um sistema de bombeamento e extrusão. Enquanto que em 4, 8, 12, 13 e 14 um sistema de monitoramento pode ser utilizado para acompanhar o processo de impressão e estabelecer interface entre operador e máquina.

Para indicar o agrupamento das funções em módulo, em uma análise mais sistemática, utilizou-se a Matriz Indicadora de Módulos (MIM) (Figura 47). O grau de relacionamento entre as funções elementares e as diretrizes de modularização pode ser definido como forte, médio ou fraco, atribuindo-se os valores 5, 3 ou 1, respectivamente.

Após realizar as ponderações adequadas na MIM, tem-se que as funções com maior somatório foram as de movimentação do bico extrusor (FE10 e FE11), que podem ser agrupadas em um sistema de movimento. Essas funções são de maior importância para a realização da função global da máquina 3D.

MATRIZ INDICADORA DE MÓDULOS			Funções Elementares														
			FE1	FE2	FE3	FE4	FE5	FE6	FE7	FE8	FE9	FE10	FE11	FE12	FE13	FE14	
			Posicionar o bico extrusor no ponto inicial	Ler Modelagem 3D da estrutura a ser construída	Gerar trajeto de extrusão do concreto	Salvar padrão no banco de dados	Accionar injeção de material na máquina	Movimentar o concreto	Configurar Viscosidade do material	Informar o operador quando o bico estiver pronto para extrudir	Executar G-Code para produzir a placa de concreto	Movimentar o bico extrusor no plano XY	Movimentar o bico extrusor no plano Z	Salvar os dados da impressão	Informar operador quando processo finalizar	Exibir os dados da impressão	
Diretrizes MIM	Desenvolvimento de Produtos	Multiaplicativo			3				1					3	1	3	
		Evolução Tecnológica	5		5					5							
		Planejamento de Alteração de Projeto					5	5	5			3	3				
	Variação	Especificação Técnica			5	1		3				5	5	1			1
		Estilo						1									
	Fabricação	Unidade Comum										3	3				
		Processo e Organização		3	3						3						
	Qualidade	Testes em Separado	5				5	5				5	5				
	Aquisição	Compra de Produtos Prontos				5				5				5	5	5	5
	Após entrar no Mercado	Manutenção e Manutenabilidade					3	3				3	3				
		Atualização	3	3	3		5		5		3						
		Reciclagem					3		3			3	3				
		Somatório	13	6	16	9	21	17	13	6	11	22	22	9	6	9	
		Classificação	6	14	5	9	3	4	7	13	8	1	2	10	12	11	

Figura 47 – Matriz indicadora de módulos (Fonte: Autora)

Um segundo possível módulo é composto pelas funções FE5, FE6 e FE7. Apesar da FE7 não estar classificada em quinto lugar, pela análise horizontal da diretriz de desenvolvimento de produtos, planejamento de alteração de projeto, pode-se concluir que ela está fortemente relacionada com a FE5 e a FE6. Neste módulo estão as funções relacionadas ao sistema de bombeamento e extrusão. A realização de testes em separado, também está fortemente relacionada com as funções FE5 e FE6.

Em seguida, as funções FE1, FE2, FE3 e FE9 foram agrupadas em um terceiro módulo que compõe o subsistema de controle e posicionamento. A modularidade foi indicada pela análise horizontal nas diretrizes de evolução tecnológica e de atualização.

As demais funções foram agrupadas em um módulo ou subsistema de monitoramento, onde os dados de impressão são salvos e o operador pode acompanhar a execução do processo. A análise horizontal indica a modularidade através do forte relacionamento das diretrizes de atualização e de compra de produtos prontos com as funções FE4, FE8, FE12, FE13 e FE14.

Alinhado ao objetivo de auxiliar o desenvolvimento do protótipo da InovaHouse3D, e como resultado desta análise de modularidade, pelo forte relacionamento entre as diretrizes de planejamento de alteração de projeto e de testes em separado com as funções do módulo de bombeamento e extrusão, decidiu-se gerar concepções alternativas para o módulo extrusor.

A decisão de gerar uma concepção focada em um subsistema do produto está em concordância com as etapas da construção de protótipo (ver 6.1 e 6.2), buscando responder questões específicas da viabilidade do produto e utilizando materiais simples e facilmente disponíveis, para a construção de modelos de prova de conceito.

A criação de concepções, baseia-se em métodos de criatividade, não limitando ou eliminando alternativas em um momento preliminar. Enquanto métodos sistemáticos, funcional e morfológico, foram utilizados para as alternativas de solução da máquina, as concepções alternativas para o módulo extrusor resultam de métodos de criatividade intuitivos, *brainstorming*, analogias, listagem de atributos.

Da figura 48, tem-se 3 alternativas de concepção para o bico extrusor de concreto. A primeira delas é baseada no protótipo construído juntamente com a equipe da InovaHouse3D, composta por uma rosca helicoidal acoplada a um motor e com abertura lateral para injeção de material. A segunda, sugere uma pequena alteração na estrutura, para injetar material pela parte superior do bico, aumentando a velocidade de inserção do material com auxílio da força gravitacional. Ambas alternativas tem um peso relativamente alto, devido ao comprimento do bico e volume de material conduzido pela rosca. E, com isso, o efeito pêndulo e a inércia da movimentação do bico, demandam uma ação de controle mais robusta, além de aumentar custos de motores e componentes.

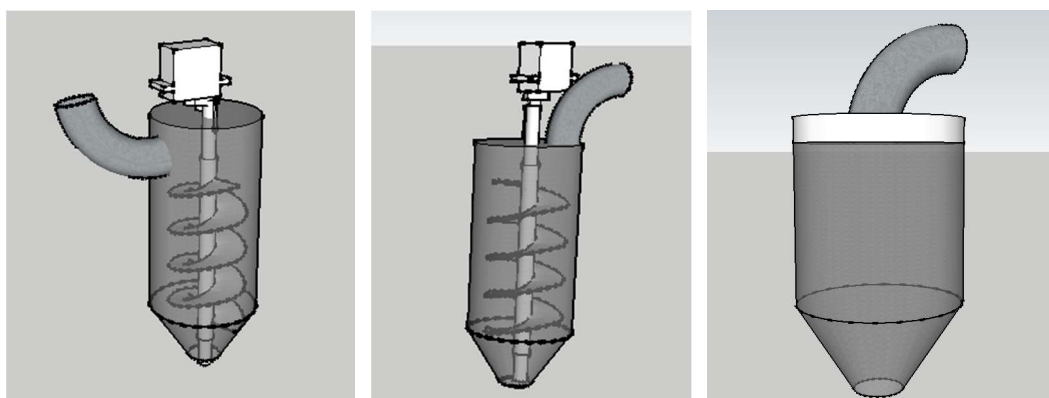


Figura 48 – Concepções alternativas para o módulo extrusor (Fonte: autora)

Em brainstorming com engenheiros civis da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) e da indústria TECRON pré-moldados, surgiu-se a ideia de desenvolver um bico com o princípio de solução semelhante a um pistão ou êmbolo, onde o disco branco se moveria para cima e para baixo, compactando e extrudindo o concreto. Ao aumentar a

pressão do concreto no compartimento, o material é compacto antes da extrusão, reduzindo a probabilidade de formação de bolhas de ar, que reduz a resistência final do concreto. Nesta concepção seria possível reduzir o comprimento do bico e seus efeitos negativos citados anteriormente.

No próximo capítulo, o modelo de prova de conceito criado no âmbito da InovaHouse3D é apresentado, abordando o processo de desenvolvimento e montagem do protótipo, bem como as principais dificuldades da equipe quanto a execução do projeto.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da síntese funcional permitiu compreender o funcionamento da máquina de maneira sistêmica, e fomentou o detalhamento do planejamento dos processos e operações envolvidos na utilização da máquina. Esses resultados, associados as alternativas de solução do sistema geradas no processo morfológico, e as concepções do subsistema do bico extrusor, são de extrema relevância para a continuidade e melhoria do desenvolvimento do protótipo alpha.

O nível de maturidade da tecnologia de extrusão guiada do concreto, ainda pouco difundida e não existente no Brasil, restringiu a efetiva aplicação da engenharia reversa. Entretanto, foi possível estabelecer a modelagem do sistema e definir princípios de solução viáveis para concepção da máquina.

CAPÍTULO 6 - O DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Este capítulo apresenta o processo de desenvolvimento da prova de conceito para o sistema de impressão 3D para concreto. Após a realização física do modelo, estabeleceu-se uma proposta para a estrutura da máquina apresentada no final deste capítulo.

Com intuito de compreender o processo de manufatura aditiva (ver 3.1) a equipe realizou a montagem da impressora Mendel da RepRap. Esta etapa está relacionada ao ganho de conhecimento do sistema técnico pelo emprego da técnica de Engenharia Reversa (ver 4.2.2). Paralelamente a esta montagem, foi feito um estudo dos sistemas aplicados à construção civil (ver 3.4), para identificar diferenças e similaridades quando comparado a manufatura aditiva para polímeros.

6.1 PLANEJAMENTO DO PROTÓTIPO

A montagem da RepRap (Figuras 49 e 50), bem como sua calibração e utilização, foi o primeiro contato da equipe com a tecnologia de impressão 3D. Nesta etapa, as etapas básicas da manufatura aditiva foram compreendidas e fixadas, da modelagem CAD, conversão para STL a impressão de objetos. Problemas de calibração e má sobreposição das camadas, bem como desalinhamento da estrutura de suporte, ocorreram com frequência e foram essências no aprendizado completo do processo e análise de falhas.



Figura 49 – Equipe montando a RepRap (Fonte: autora)

Em seguida, a equipe buscou por projetos similares e foram encontradas impressoras 3D em diversos níveis de maturidade. Muitas universidades nos Estados Unidos e Europa produziram artigos e projetos semelhantes. O trabalho de mestrado, *Concrete 3D*

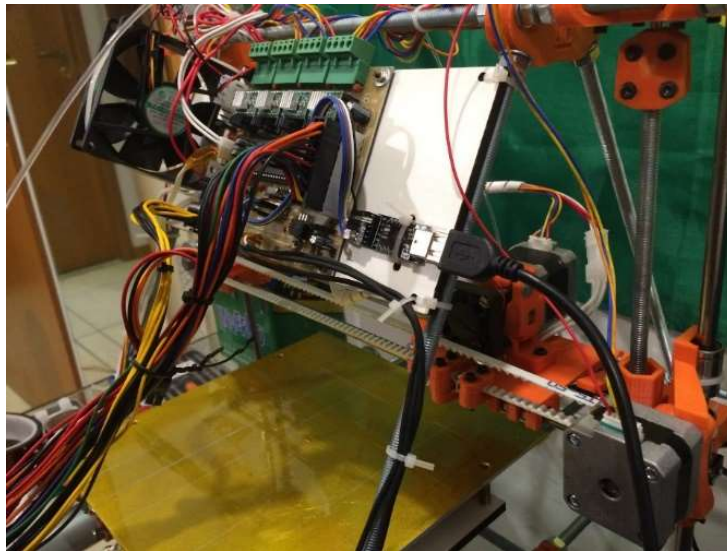


Figura 50 – Impressora montada e calibrada (Fonte: autora)

printer, da universidade sueca *Lund University*, foi a principal referência para o desenvolvimento do protótipo na InovaHouse3D. Este trabalho acoplou um braço robótico no sistema, aumentando o grau de liberdade da impressão. O bico extrusor concebido é formado por uma rosca helicoidal e um motor DC acoplado ao eixo da rosca. E, em consequência, desta dissertação decidiu-se montar e testar o módulo extrusor, com intuito de avaliar o comportamento do material e auxiliar no desenvolvimento e continuidade do projeto.

6.2 CONSTRUÇÃO DA PROVA DE CONCEITO

Decidiu-se construir uma prova de conceito para facilitar a continuidade do projeto, sabendo-se que a realização física de um sistema fornece conhecimento empírico sobre os processos envolvidos. Como as questões urgentes a serem respondidas pela prova de conceito relacionam-se ao comportamento do material durante sua extrusão, optou-se por focar a construção no protótipo nesta parte, desenvolvendo o módulo extrusor responsável pelas funções elementares indicadas na MIM (ver 5.4).

O módulo extrusor é composto pela rosca helicoidal, um tubo de PVC com abertura lateral para entrada do material e um motor DC acoplado ao eixo (Figura. 53). Para sua construção, buscou-se materiais de baixo custo e de fácil aquisição. Todo o trabalho de montagem foi feito pela equipe da InovaHouse3D, corte e fixação das lâminas no tudo de PVC. Nesta etapa, foram realizados testes com motores de furadeira, de ventilador e de parafusos, adquiridos em depósitos a baixo custo. A conexão do motor à rosca foi feita com auxílio da tampa do cano e não apresentou boa estabilidade, desacoplando nos primeiros testes de extrusão com barro.



Figura 51 – Bico extrusor construído pela equipe da InovaHouse3D (Fonte: autora)

Foi construído um carrinho com roldanas para possibilitar o movimento do módulo extrusor sobre um trilho e cabos de aço. Este cabo se conecta a roldana do material e ao segundo motor acoplado na estrutura de suporte. A primeira estrutura construída tinha largura inferior à necessária para inserir o bico entre as roldanas do carrinho, sendo necessária a reconstrução de uma nova estrutura de suporte, conforme indicado na figura 52.

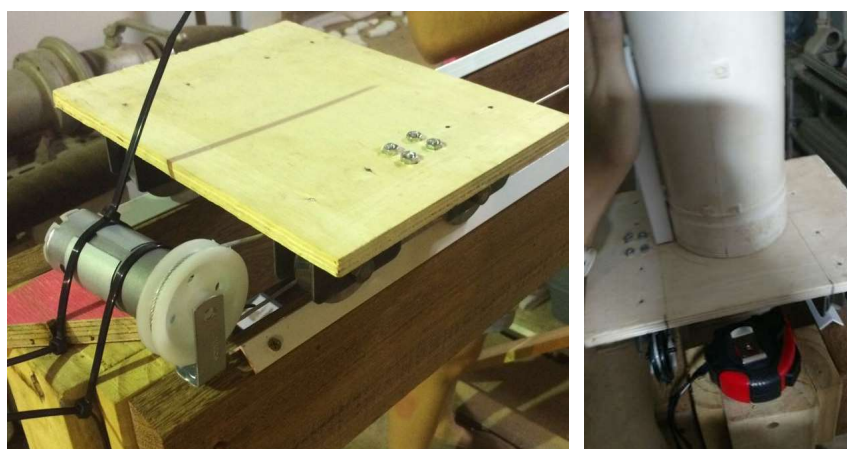


Figura 52 – Detalhes do carrinho do protótipo (Fonte: autora)

A estrutura inicialmente construída foi incompatível com o módulo de extrusão, desenvolvido paralelamente, porém sem avaliação de interfaces e compatibilidade dos módulos. Dessa maneira, outras estruturas foram projetadas e contratou-se serviço de serralheria para construção da estrutura final, conforme figura 53.

A movimentação do bico extrusor ao longo do eixo X foi feita através do controle de malha aberta, devido à ausência de sensor de fim de curso. Foi estipulado um tempo médio de movimentação do bico extrusor (sem material) ao percorrer o eixo X e, utilizando-se o

Arduino, foi programado um loop definindo um delay ou tempo de funcionamento seguido da inversão do sentido de rotação do motor.

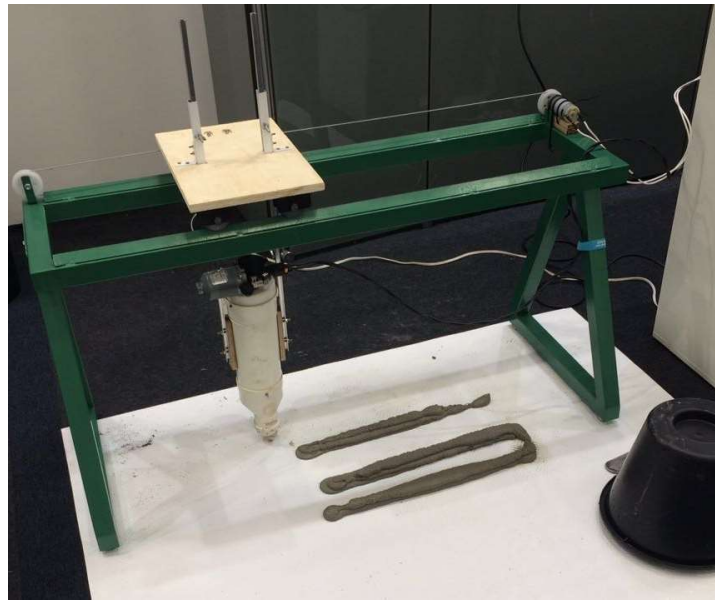


Figura 53 – estrutura final do protótipo (Fonte: autora)

6.3 ESTRUTURA PROPOSTA

Baseado na estrutura da RepRap (apresentada no capítulo 2), como resultado do desenvolvimento do protótipo e deste trabalho, a figura 54 apresenta uma proposta de estrutura para o protótipo alpha, construído com mesmo material e geometria do produto final, apesar do processo de manufatura não ser o mesmo, agrupando os subsistemas da máquina.

O módulo 1 (software), não sofre alterações quando comparado a estrutura da RepRap. O módulo 2 (eletrônica), demanda componentes mais robustos e um painel de controle industrial, devido as dimensões e ambientes de operação da máquina. Um sensor indutivo é sugerido para automatizar a movimentação ao longo do eixo X, quando comparado aos contatos de fim de curso utilizados na RepRap, são mais resistentes e menos sensíveis ao desgaste ou má funcionamento ocasionado por poeira, comparado aos sensores óticos.

O módulo 3 (mecânica) é semelhante ao da RepRap, exceto pelas dimensões dos trilhos e roldanas necessários para suportar os esforços mais intensos para uma máquina de impressão de concreto.

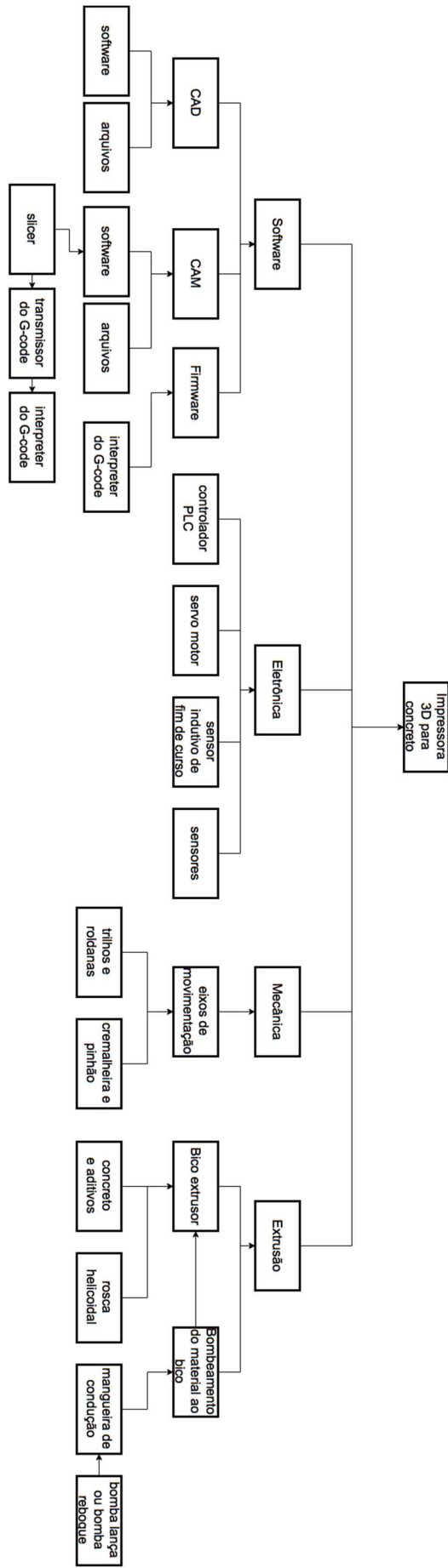


Figura 54 – proposta de estrutura para o protótipo alpha (Fonte: autora)

E finalmente o módulo 4 (extrusão), especialmente avaliado neste trabalho, é completamente diferente do sistema de extrusão roboticamente guiado com técnica FDM. O tanque com o material para abastecer o sistema durante uma impressão, deve ser suficientemente grande para não interromper o processo por falta de material, mas também deve ser de fácil locomoção e operação. Sugere-se a utilização inicial de uma bomba reboque pequena e, de acordo com a evolução do projeto, a bomba-lança pode ser uma melhor opção. A mangueira de condução do material da bomba ao bico deve ter rigidez apropriada para suportar o peso do material e a pressão resultante do bombeamento, deve-se realizar uma seleção de materiais e conexões criteriosa.

Devido as características do material, a utilização da rosca helicoidal é fortemente recomendada, por dominar os projetos similares, além de estar presente em máquinas para produção de blocos de concreto. Além disso, o bico extrusor deve ter um compartimento com tamanho suficiente para possível injeção de aditivos aceleradores de pega e que forneça tempo para ocorrer a reação entre os aditivos e o concreto.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do protótipo iniciou-se antes do estudo do processo de projeto apresentado neste trabalho. Em consequência disso, erros na conexão da estrutura de suporte e do módulo extrusor, atrasaram a construção do protótipo e acarretaram em desperdício de recursos.

Sabendo-se que a aplicação das metodologias de desenvolvimento integrado de produto reduz o tempo de desenvolvimento do produto, o número de modificações no projeto e aumenta a qualidade do produto, foi mapeada a necessidade de aplicar tais metodologias ao desenvolvimento do protótipo da startup InovaHouse3D. Mesmo após a construção do protótipo já ter sido iniciada, os resultados deste projeto impactaram sua continuidade.

A empresa foi escolhida pela facilidade de acesso a informações da autora, que atua diretamente no desenvolvimento de produtos da empresa. Por meio da observação e envolvimento com a empresa selecionada e por meio da revisão da literatura definiu-se as concepções viáveis para um módulo de extrusão de maior eficiência e qualidade de produção.

No cenário uma startup, o medo da crítica e a motivação em excesso, definidos como barreiras da criatividade (cap. 4), foram obstáculos para uma efetiva modelagem do MVP, onde objetivos difíceis de serem alcançados ofuscaram a visão e dificultaram a eficácia no desenvolvimento de uma concepção complexa.

O ciclo de feedback CONSTRUIR-APRENDER-MEDIR, método sistemático para o processo de aprendizagem, é o alicerce do modelo de startup enxuta - um novo modo de pensar e desenvolver inovação com um negócio sustentável (Eric Ries, 2012). O progresso

de uma startup está intrinsecamente ligado ao processo de aprendizagem, iniciado com o desenvolvimento do primeiro MVP, que possibilita a execução de uma volta completa no ciclo construir-aprender-medir, com o mínimo de esforço e o menor tempo de desenvolvimento.

Percebeu-se que a aplicação das metodologias de desenvolvimento de produto, existentes até o momento, demanda um tempo considerável de desenvolvimento, não sendo viável para a realidade de uma startup enxuta. Além das limitações de recursos econômicos e financeiros que limitam a realização do projeto, aquisição de ferramentas e capacitação da equipe.

Em contrapartida, acredita-se que a realização do projeto detalhado a partir da proposta de estrutura pré-definida tem potencial para finalizar o projeto de desenvolvimento de produtos, com detalhamento técnico em baixo nível de abstração e planejamento para produção da máquina, envolvendo todas as etapas do ciclo de vida de um equipamento industrial tecnológico.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES

7.1 ANÁLISE DOS OBJETIVOS E RESULTADOS

Os resultados alcançados com o desdobramento funcional são inéditos para a modelagem de processos de manufatura aditiva aplicados à construção civil. O desdobramento em detalhes do sistema, envolvendo desde a modelagem computacional a operação da máquina, ainda que em alto nível de abstração, mapeou o processo completo para utilização da tecnologia de impressão 3D em construções.

O desenvolvimento deste projeto contou com o apoio da equipe de Projeto PSP6 e da InovaHouse3D, majoritariamente estudantes de engenharia de produção e elétrica. Entretanto, uma equipe multidisciplinar é imprescindível para o sucesso dos métodos de criatividade que permeiam o processo de desenvolvimento de produtos.

Neste contexto, identificou-se que outras habilidades na equipe seriam necessárias para avaliar: propriedades de escoamento e viscosidade do material, técnicas de controle avançadas, noções de ergonomia e conhecimento de estética de produtos. Além do *know-how* da cadeia produtiva da construção civil para definir e converter de maneira adequada as necessidades dos clientes e partes interessadas em requisitos de projeto.

Utilizado por uma equipe multidisciplinar (engenheiros civil, químico, eletricitista, mecânico e de produção; economista, analista de mercado e de negócios), integrando os conhecimentos necessários e a estrutura de CAD, CAPP e CAM propostas por este projeto, acredita-se ser possível estabelecer a concepção de uma máquina adequada as restrições de material e normativas, e com produtividade adequada ao problema.

7.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Em decorrência das conclusões e aprendizados deste projeto, bem como das experiências e *feedbacks* recebidos no âmbito da InovaHouse3D, são propostos diversos tópicos para complementar e fundamentar a viabilidade do uso da manufatura aditiva como princípio de solução para a construção civil.

Do ponto de vista técnico, o estudo da tecnologia do concreto, considerando propriedades de bombeamento, cura química, os efeitos de aditivos plastificantes e aceleradores de pega, e a resistência final do concreto é crucial para o sucesso do projeto. Também é relevante avaliar a redução ou eliminação de armação nos elementos estruturais através da adição de fibra de vidro, ou outros componentes adequados, na composição do concreto. Tendo em vista que a intercalação de estrutura de suporte entre as camadas

impressas, de maneira manual ou automatiza, implica diretamente no tempo de espera para sobreposição de camadas.

Para completa automatização do protótipo alpha da InovaHouse3D, faz-se necessário desenvolver o módulo mecatrônico dos sistemas de controle, com movimentação automatizada nos eixos x, y e z, do protótipo atual da InovaHouse3D. E, simultaneamente, devem ser analisadas e simuladas as interfaces dos subsistemas para integrar o sistema, antes da construção do protótipo alpha.

Do ponto de vista gerencial, existe demanda para o desenvolvimento de sistemas que facilitem a utilização das metodologias de desenvolvimento de produto, e de sistemas de gestão do conhecimento, aplicados a realidade de uma pequena empresa de base tecnológica.

E finalmente, a elaboração da viabilidade econômica para o desenvolvimento e comercialização da máquina de impressão 3D para concreto no Brasil em dois cenários: processo de construção em ciclo fechado e ciclo aberto. Para tanto, recomenda-se realizar um estudo prévio da indústria de pré-fabricados no Brasil, que identifique oportunidades de otimização do processo através da utilização de uma máquina de extrusão guiada, excluindo a necessidade de formas ou moldes no processo de produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BACK, N. **Projeto Integrado de Produtos: Planejamento, Concepção e Modelagem**. Barueri: Manole, 2008.

BLUMENSCHNEIN, R. **A Sustentabilidade Na Cadeia Produtiva Da Indústria Da Construção**. UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. Brasília, 2004.

CBIC. Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Banco de dados online. Disponível em http://memoria.cub.org.br/p_reports_br.php?id=25. Acesso em: 11 abril de 2016.

CONTOUR CRAFTING. Media Room. Disponível em: <http://www.contourcrafting.org/>. Acesso em: 30 de março de 2016.

DOWNEY, W. G. **Development of cost estimating. Report of the Steering Group for the Ministry of Aviation**. England, HMSO, 1969.

GROHMANN, M. Z. Redução do desperdício na construção civil: levantamento das medidas utilizadas pelas empresas de Santa Maria. **Associação Brasileira de Engenharia de Produção**, 1998.

HEHENBERGER, P. Hierarchical design models in the mechatronic product development process of synchronous machines. **Mechatronics**, v. 20, p. 865-875, 2010.

HEHENBERGER, P. Perspectives on hierarchical modelling in mechatronic design Advanced Engineering Informatics. **Advanced Engineering Informatics**, v. 28, p. 188-197, 2014.

JONES, R., HAUFE, P., SELLS, E., IRAVANI, P., OLLIVER, V., PALMER, C., & BOWYER, A. **RepRap -The Replicating Rapid Prototyper RepRap – The Replicating Rapid Prototyper**. 2009.

KHOSHNEVIS, B., KWON, H., & BUKKAPATNAM, S. **Automated construction using contour crafting**. Los Angeles, 2000.

KWON, H. **Experimentation and Analysis of Contour Crafting (CC) Process Using Uncured Ceramic Materials**. GRADUATE SCHOOL UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA. Los Angeles, 2002.

ANELL, L. H. **Concrete 3D Printer**. Lund University. Lund, 2015.

LIM, S. **Development of a viable concrete printing process**. LOUGHBOROUGH UNIVERSIT. Loughborough, s.d.

LIEYUN, D.; RAN, W.; HAICHAOA, C. **Development of a BIM-based automated construction system**. Creative Construction Conference, 2014. 18-23.

PINTO, T. De volta à questão do desperdício. **Construção**. São Paulo, n.271, p.34-35, dez. 1995.

RepRapWiki. Disponível em: <http://reprap.org/>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2016.

ROZENFELD, H. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria de processos**. São Paulo: Saraiva, 2006.

ROMANO, L. N. **Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Florianópolis, 2003.

RUDENKO, A. Rudenko's 3D Printer. TotalKustom Portal. Disponível em: <http://www.totalkustom.com>. Acesso em: 12 de abril de 2016

SANTOS, M. D. F. D. **Técnicas construtivas em alvenaria estrutural: contribuição ao uso**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. Santa Maria, 1998.

SMITH, P.G; REINERTSEN, D.G. **Developing products in half the time**. New York, Van Nostrand Reinhold, 1991.

THAKAHASHI, S. **Gestão de inovação de produtos: estratégia, processo, organização e conhecimento**. Rio de Janeiro: Elsevier. 2007.

ZHENG, C., BRICOGNE, M., LE DUIGOU, J., & EYNARD, B. Survey on mechatronic engineering: A focus on design methods and product models. **Advanced Engineering Informatics**, v. 28, p. 241-257, 2014.

WARSAWSKI, A. **Industrialized and automated building systems: a managerial approach**. New York: E & FN Spon, 1999.

ANEXOS

Anexo 1 – Requisitos de clientes e especificações meta - PSP6

Anexo 2 – Visita técnica à TECRON Pré-moldados

Anexo 1 – Requisitos de clientes e especificações meta - PSP6

Desenvolvido em conjunto com a equipe do projeto PSP6, disciplina da engenharia de produção na Universidade de Brasília, este anexo apresenta as especificações meta para o problema deste trabalho, obtido através da aplicação das metodologias de desenvolvimento de produto.

Segundo Back (2008), na fase de elaboração de projeto do produto, incluem-se as fases próprias da execução do projeto para tornar concretas as demandas dos usuários, na forma do produto avaliado técnica e economicamente. São consideradas as fases próprias do processo de projeto de produto, dividido em projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado. No decorrer do projeto, as necessidades dos clientes e os requisitos do projeto são convertidos em soluções para o produto e possibilitam sua realização física.

O projeto informacional almeja identificar e analisar restrições operacionais e de projeto ao conceber uma impressora 3D para concreto. Tendo como clientes externos construtoras e incorporadoras, identificou-se que o valor esperado em um produto para promover inovação na construção civil deve reduzir a dependência da mão de obra nos canteiros bem como promover o aumento de produtividade e competitividade.

A principal ferramenta utilizada no projeto informacional será a matriz QFD (Quality Function Deployment), estruturada nos seguintes processos: definição do problema de projeto, identificação do ciclo de vida do produto, estabelecimento dos requisitos de cliente e de produto e a criação da lista de especificações meta.

Foram levantados os requisitos dos clientes de acordo com suas necessidades. Esses requisitos foram comparados entre si, um a um, pelo diagrama de Mudge, resultando na classificação de importância dos requisitos, conforme apresentado na tabela 10.

Os requisitos de cliente na foram hierarquizados e ponderados segundo uma escala Likert, de acordo com o princípio de Pareto, onde os requisitos que somaram maior peso no diagrama de Mudge receberam o maior peso (5), os que somaram menor pontuação receberam menor peso (1). A distribuição gráfica dos pesos pode ser vista no Gráfico de Pareto (figura 55).

Tabela 10 - Requisitos de cliente classificados e ordenados (Fonte: autora)

Requisito de Cliente	Pontos	Ac	%Ac	Peso QFD
Ter baixo tempo de impressão	96	96	6%	5
Ter velocidade constante de extrusão (consumo de concreto)	83	179	12%	5
Ter fluxo de extrusão constante	82	261	17%	5
Ter baixo índice de falhas	79	340	23%	5
Ter baixo índice de acidentes	79	419	28%	5
Ter baixo custo de operação	70	489	33%	5
Ter interface com o usuário simples	65	554	37%	5
Ter baixo nível de vibrações	59	613	41%	5
Ter baixo índice de retrabalho	58	671	45%	5
Ter baixo tempo de transporte no canteiro	58	729	49%	5
Ser desmontável	55	784	53%	4
Ter módulos resistentes à fadiga	53	837	56%	4
Ter baixo consumo de energia	47	884	59%	4
Ter alto grau de automatização	46	930	62%	4
Ter baixo tempo de desmontagem	46	976	65%	4
Ter material extrudido compatível com as normas	41	1017	68%	4
Ter baixo custo de manutenção	38	1055	71%	4
Ter pintura com resistibilidade à oxidação	38	1093	73%	4
Ter poucos comandos para operar a máquina	37	1130	76%	4
Ter pouco esforço físico na atividade de reparação	35	1165	78%	3
Ter poucos cantos vivos	34	1199	80%	3
Ter velocidade de extrusão que evite perda de concreto	34	1233	83%	3
Ter alto grau de liberdade arquitetônico	30	1263	85%	3
Ter grande intervalo entre manutenções	26	1289	86%	3
Ter fácil remoção dos componentes	24	1313	88%	3
Ter fácil inspeção de componentes	23	1336	90%	2
Ter componentes de fácil aquisição no mercado	22	1358	91%	2
Ser de fácil alimentação energética	21	1379	92%	2
Ter manutenção automatizada	21	1400	94%	2
Ser capaz de extrudir concreto em diferentes formulações	20	1420	95%	2
Ter fácil limpeza das peças	19	1439	96%	2
Ser de troca rápida de componentes	18	1457	98%	2
Ter número adequado de módulos	10	1467	98%	2
Ter módulos reutilizáveis	8	1475	99%	1
Ter capacidade de armazenar dados	8	1483	99%	1
Ter partes recicláveis	5	1488	100%	1
Ter fácil reinstalação do sistema da máquina	2	1490	100%	1
Ter pouca geração de resíduos	2	1492	100%	1
SOMA	1492			

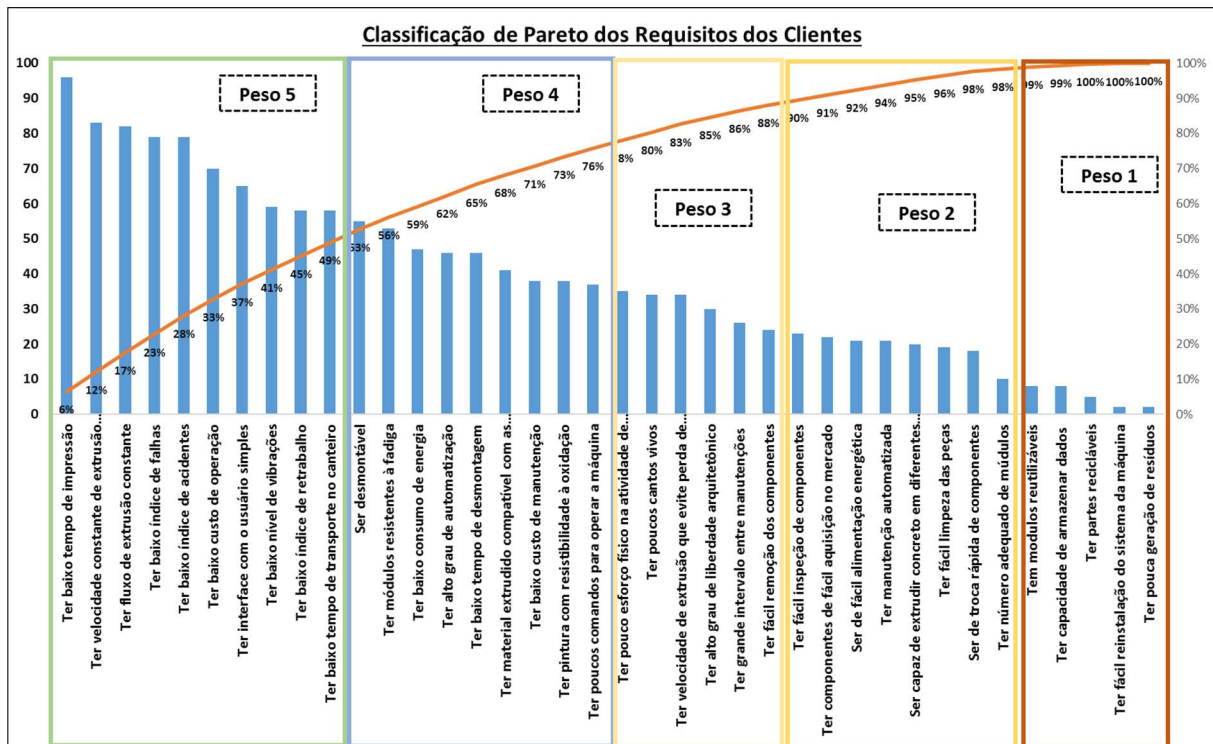


Figura 55 – Gráfico de Pareto para priorização dos requisitos de cliente (Fonte: autora)

A estrutura típica da casa da qualidade, ou primeira matriz do QFD, é composta por:

1. Requisitos dos clientes
2. Importância
3. Benchmarking competitivo
4. Requisitos do produto
5. Matriz de relacionamentos
6. Quantificação dos requisitos do produto
7. Matriz de correlação

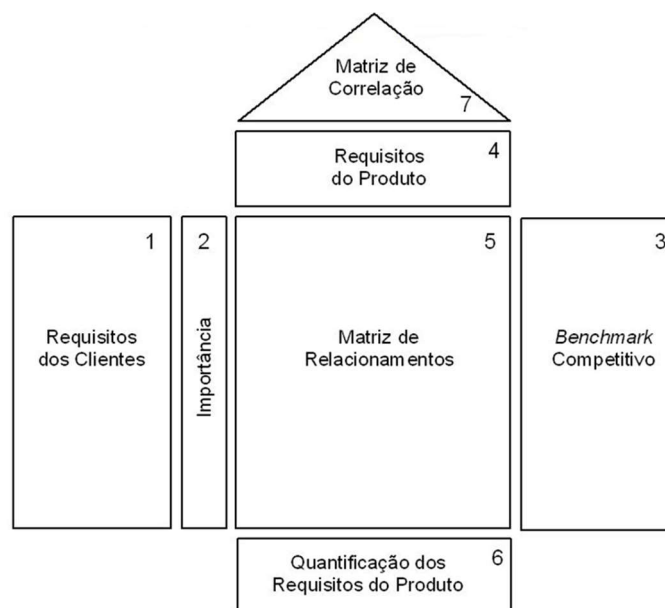


Figura 56 – Casa da qualidade (Fonte: Rozenfeld 2006)

Considerando os requisitos de cliente obtidos, a Tabela 11 mostra os seus respectivos pesos relativos obtidos pela classificação do diagrama de Mudge, os seus pesos provenientes da curva acumulativa de Pareto e seus pesos para os concorrentes representando o benchmarking competitivo. Essa tabela contempla os três primeiros itens que foram acima.

O plot entre os pesos do produto a ser desenvolvido e os pesos do benchmarking competitivo dos concorrentes e da análise de Kano, resultou no Gráfico 4 – Análise de Competitividade.

Pode-se observar que os pesos dos requisitos dos clientes para o produto em desenvolvimento superam os pesos do benchmarking competitivo e os pesos da análise de mercado de Kano.

A parte 4 da QFD consiste em definir os requisitos de produto através da conversão dos requisitos de cliente em expressões mensuráveis (Tabela 12):

A seguir foi feita a matriz de relacionamento (Tabela 13) entre os requisitos de clientes e de produto, o que resulta no grau de importância dos requisitos de produto. Em seguida, realizou-se o benchmarking técnico para estabelecer valores meta (parte superior da tabela) e a matriz de correlação (Tabela 12) para identificar redundâncias, restrições e outras incoerências nos requisitos de produto.

Tabela 11 – Parte 1 da QFD (Fonte: autora)

Row number	Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Weight / Importance	Relative Weight	Our Current Product	Impressão 3D USA	Pré Moldado	Alvenaria Tradicional	Classificação de Kano
1	Ter baixo tempo de impressão	96	6,43	5	4	3	1	3
2	Ter velocidade constante de extrusão (consumo	83	5,56	5	5	2	0	3
3	Ter fluxo de extrusão constante	82	5,50	5	5	2	0	4
4	Ter baixo índice de falhas	79	5,29	5	4	2	1	4
5	Ter baixo índice de acidentes	79	5,29	5	5	3	1	2
6	Ter baixo custo de operação	70	4,69	5	3	3	1	4
7	Ter interface com o usuário simples	65	4,36	5	3	4	4	3
8	Ter baixo nível de vibrações	59	3,95	5	4	3	2	4
9	Ter baixo índice de retrabalho	58	3,89	5	4	2	2	4
10	Ter baixo tempo de transporte no canteiro	58	3,89	5	2	4	4	4
11	Ser desmontável	55	3,69	4	3	4	2	2
12	Ter módulos resistentes à fadiga	53	3,55	4	3	4	2	3
13	Ter baixo consumo de energia	47	3,15	4	3	3	2	4
14	Ter alto grau de automatização	46	3,08	4	4	2	0	3
15	Ter baixo tempo de desmontagem	46	3,08	4	2	3	1	4
16	Ter material extrudido compatível com as norma	41	2,75	4	2	5	4	2
17	Ter baixo custo de manutenção	38	2,55	4	2	4	3	4
18	Ter pintura com resistibilidade à oxidação	38	2,55	4	3	3	1	4
19	Ter poucos comandos para operar a máquina	37	2,48	4	2	3	4	4
20	Ter pouco esforço físico na atividade de reparação	35	2,35	3	3	2	4	4
21	Ter poucos cantos vivos	34	2,28	3	3	2	3	3
22	Ter velocidade de extrusão que evite perda de c	34	2,28	3	4	2	1	3
23	Ter alto grau de liberdade arquitetônico	30	2,01	3	2	1	3	4
24	Ter grande intervalo entre manutenções	26	1,74	3	2	3	3	4
25	Ter fácil remoção dos componentes	24	1,61	3	2	3	3	3
26	Ter fácil inspeção de componentes	23	1,54	2	2	4	3	4
27	Ter componentes de fácil aquisição no mercado	22	1,47	2	1	4	4	3
28	Ser de fácil alimentação energética	21	1,41	2	2	3	4	2
29	Ter manutenção automatizada	21	1,41	2	2	1	1	2
30	Ser capaz de extrudir concreto em diferentes fo	20	1,34	2	3	2	3	2
31	Ter fácil limpeza das peças	19	1,27	2	3	2	2	2
32	Ser de troca rápida de componentes	18	1,21	2	2	3	3	2
33	Ter número adequado de módulos	10	0,67	2	2	2	0	2
34	Tem modulos reutilizáveis	8	0,54	1	2	2	0	2
35	Ter capacidade de armazenar dados	8	0,54	1	5	1	0	1
36	Ter partes recicláveis	5	0,34	1	2	2	2	2
37	Ter fácil reinstalação do sistema da máquina	2	0,13	1	5	1	0	1
38	Ter pouca geração de resíduos	2	0,13	1	4	2	0	1

Tabela 12 – Requisitos de Produto (Fonte: autora)

Row Number	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")		
		9	Resistência do concreto
1	Nº. de comandos para executar a impressão	10	Nº. de módulos
2	Nº. de operadores	11	Taxa corrosão uniforme
3	Exigência de esforços físicos do operador	12	Nº. de fornecedores que atendem a ISO 9001
4	Nº. de dias para impressão	13	Tempo de bombeamento
5	Custo de fabricação	14	Produtividade de extrusão do material
6	Potencia instalada	15	Frequência de reiniciação do processo
7	Custo de manutenção	16	Nº. de materiais para impressão
8	Nº. Componentes disponíveis no mercado local	17	Memória de armazenagem de dados

Tabela 13 - - Matriz de Relacionamento (Fonte: autora)

Relationship Between Requirements:
9 - Strong 3 - Moderate 1 - Weak

		Column Number																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
Max Relationship Value in Column		9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9		
Requirement Weight		199,1	342,9	361,3	380,6	470,107	227,8	452,28	170,7	134,1	450,5	185,4	131,4	300,9	380,9	353,5	175,9	86,06		
Relative Weight		4,14	7,14	7,52	7,92	9,79	4,74	9,42	3,55	2,79	9,38	3,86	2,73	6,26	7,93	7,36	3,66	1,79		
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)		5	5	4	8	8	3	5	9	10	4	4	7	9	9	6	9	2		
Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)		▼	▼	▼	▼	▼	x	▼	▲	▲	x	x	▲	▼	▲	x	▲	x		
Target or Limit Value		10	1	10Kg	3dias	\$300 mil	20CV	nil/ Insp	50%	35MPa	7	mm/a	80%	150mir	2m2/h	5%	3	1TB		
Row Number	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Demedanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")																
				Nº. de comandos para executar a impressão	Nº. de operadores	Exigência de esforços físicos do operador	Nº. de dias para impressão	Custo de fabricação	Potencia instalada	Custo de manutenção	Nº. Componentes disponíveis no mercado local	Resistência do concreto	Nº. de módulos	Taxa corrosão uniforme	Nº. de fornecedores que atendem a ISO 9001	Tempo de bombeamento	Produtividade de extrusão do material	Frequência de reiniciação do processo	Nº. de materiais para impressão	Memória de armazenagem de dados
1	9	6,43	Ter baixo tempo de impressão	3	1	3	9	3	3	9	1	3	3	1		9	9	9	3	
2	9	5,56	Ter velocidade constante de extrusão (consumo de concreto)	1	1	1	3	3	3	1		3	1	3		9	9	3	3	
3	9	5,50	Ter fluxo de extrusão constante	1	1	1	3	3	3	1		3	1	3		9	9	3	3	
4	9	5,29	Ter baixo índice de falhas	1	3	3	9	9		9	3	1	1	3		1	9	9	3	
5	9	5,29	Ter baixo índice de acidentes	3	9	9	3	9	3	1			3	1		3	3	3		
6	9	4,69	Ter baixo custo de operação	3	9	3	1	1	3	3			9	3	3	3	9	3	3	3
7	9	4,36	Ter interface com o usuário simples	9	9	9	3	3	1	1			9			1	1	3		3
8	9	3,95	Ter baixo nível de vibrações		1	1	3	9	1	9	1	1	9	3	3	1	3	9	1	
9	9	3,89	Ter baixo índice de retrabalho	3	3	3	9	1		1			1			1	3	9		

10	9	3,89	Ter baixo tempo de transporte no canteiro		3	3	9	3	9	3			9	1		1	1	1	1	
11	9	3,69	Ser desmontável	1	3	9	9	9	3	3	1		9	1	1	3	1			1
12	9	3,55	Ter módulos resistentes à fadiga			1	1	9		9	3	1	9	3	3	1	1	1	1	
13	9	3,15	Ter baixo consumo de energia	1		1	3	9	9	1	1		3		1	3	3	1	1	1
14	9	3,08	Ter alto grau de automatização	9	9	9	3	9	3	9	9	1	3	1	3	3	3	3	3	9
15	9	3,08	Ter baixo tempo de desmontagem	1	3	9	9	3	3	3	1		9	1				1	1	
16	9	2,75	Ter material extrudido compatível com as normas				1	3	3	3	3	9	1	1	3	3	3	3	9	
17	9	2,55	Ter baixo custo de manutenção		3	3	1	3	3	9	1	9		1	3	9	9	9	9	
18	9	2,55	Ter pintura com resistibilidade à oxidação			1		3		3	1		3	9						
19	9	2,48	Ter poucos comandos para operar a máquina	9	9	9	3	3	1	1			3			1	1	9	1	3
20	9	2,35	Ter pouco esforço físico na atividade de reparação	1	9	1	3	3		9			9	3	3					1
21	3	2,28	Ter poucos cantos vivos		1	3		3		3	1		1	3	1					
22	9	2,28	Ter velocidade de extrusão que evite perda de concreto	1	1	1	3	3	1	3	9		3	3	9	3	3	1	1	
23	9	2,01	Ter alto grau de liberdade arquitetônico	3	1	1	1	9	3	9	9	3	3	1		1	1	3	1	
24	9	1,74	Ter grande intervalo entre manutenções		3	1	3	9		9	3		3	3	3					
25	9	1,61	Ter fácil remoção dos componentes		3	3		3		9	3		9	1	1			1		1
26	9	1,54	Ter fácil inspeção de componentes		3	9		3	1	9	3		3		3					1
27	9	1,47	Ter componentes de fácil aquisição no mercado					3		9	9		1		9					
28	9	1,41	Ser de fácil alimentação energética	3	1		3	3	9				1			3	3	1		1
29	9	1,41	Ter manutenção automatizada	1	9	9	1	3	1	9	3		9	1	1					1
30	9	1,34	Ser capaz de extrudir concreto em diferentes formulações	1	1	1		3		1	3	9	3	1	3	9	9	9	9	1
31	9	1,27	Ter fácil limpeza das peças		3	3				3			9	9						
32	9	1,21	Ser de troca rápida de componentes	3	9	3	3	3	1	3	1		9	1	1					1
33	9	0,67	Ter número adequado de módulos	1	3	3		9	1	3	3		9	1						
34	9	0,54	Ter módulos reutilizáveis					1		1	3		9		3					
35	9	0,54	Ter capacidade de armazenar dados	1	1	3		1		3	1							1		9
36	1	0,34	Ter partes recicláveis								1		1							
37	9	0,13	Ter fácil reinstalação do sistema da máquina	1			1			3									3	9
38	9	0,13	Ter pouca geração de resíduos		1			3		1				3			9	3	1	

Tabela 14 - Telhado da QFD (Fonte: autora)

Row Number	Column Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")	Nº. de comandos para executar a impressão	Nº. de operadores	Exigência de esforços físicos do operador	Nº. de dias para impressão	Custo de fabricação	Potencia instalada	Custo de manutenção	Nº. Componentes disponíveis no mercado local	Resistência do concreto	Nº. de módulos	Taxa corrosão uniforme	Nº. de fornecedores que atendem a ISO 9001	Tempo de bombeamento	Produtividade de extrusão do material	Frequência de reiniciação do processo	Nº. de materiais para impressão	Memória de armazenagem de dados	
1	Nº. de comandos para executar a impressão																	
2	Nº. de operadores																	
3	Exigência de esforços físicos do operador	+	-															
4	Nº. de dias para impressão	+		+														
5	Custo de fabricação	-	+		-													
6	Potencia instalada				-	+												
7	Custo de manutenção	-	+	+	-		+											
8	Nº. Componentes disponíveis no mercado local							-		-								
9	Resistência do concreto																	
10	Nº. de módulos	+		+		+	+	-	+									
11	Taxa corrosão uniforme										-							
12	Nº. de fornecedores que atendem a ISO 9001											+						
13	Tempo de bombeamento	+		+	+	-	-											
14	Produtividade de extrusão do material	-			-	-	+								-			
15	Frequência de reiniciação do processo	+		+	+										-	-		
16	Nº. de materiais para impressão														-	-		
17	Memória de armazenagem de dados	+					+											

As especificações-meta são a base para um projeto de desenvolvimento de produto, embasando os critérios de avaliação e tomada de decisão ao longo do projeto. Sendo a saída do projeto informacional, elas representam os requisitos do cliente em termos de requisitos de projeto. Dessa forma, buscando solucionar um problema é possível desenvolver um produto orientado ao cliente a partir das especificações de projeto. Portanto, o sucesso do produto e a satisfação do cliente estão intrinsecamente relacionados a um conjunto de especificações relevantes e coerentes, sendo essas responsáveis por guiar e ou orientar a geração de soluções para conceber o produto.

Para o projeto em questão, após a elaboração da QFD, tem-se o quadro resumo das especificações (Tabela 15) meta de acordo com os valores meta definidos no benchmarking técnico com produtos concorrentes.

Tabela 15 - Especificações meta para a máquina de impressão 3D para concreto (Fonte: autora)

Requisitos de Projeto	Unidade	Objetivos	Sensor	Saídas indesejáveis	Comentários
Custo de fabricação	\$	\$300 mil	Verificação no projeto preliminar	Ser mais caro que \$150.000	
Custo de manutenção	\$	\$12 mil/ Inspeção	Informações dos usuários	Alto custo de manutenção	
Nº. de módulos	Nº	7	Verificação no projeto preliminar	Não permitir testes em separado	É uma restrição devido ao tipo de desenvolvimento de produto que inclui parceiro tecnológico para a construção da máquina, o que torna a modularidade uma restrição.
Produtividade de extrusão do material	m/h	2m ² /h	Verificação no projeto preliminar	Ter produtividade menor que a dos concorrentes	
Nº. de dias para impressão	Dias	3dias	Informações dos usuários	Ter tempo maior que o processo tradicional	
Exigência de esforços físicos do operador	Kg	10Kg	Fiscalização SST	Operário lesionado por sobrecarga	Embasado em pesquisas do NIOSH - National Institute for Occupational Safety and Health
Frequência de reiniciação do processo	%	0,05	Sensores e armazenagem do número de reiniciação do sistema para o ponto inicial de impressão	Aumento do tempo de impressão e perda no processo	Em média um pé-direito tem 2,8 m, considerando uma camada como se tendo 5cm, têm-se 56 camadas. Logo, com um índice menor que 1%, teremos um erro deste tipo a cada quatro casas aproximadamente.
Nº. de operadores	Nº	1	Verificação nos testes	Demandar muita mão de obra	
Tempo de bombeamento	Minutos	150min	Verificação no projeto preliminar	Ter perda de material acima do esperado (5-10%)	A NBR 7212, para execução de concreto dosado em central, estipula o tempo máximo de transporte da central até a obra em 90 min, bem como o tempo máximo para que o concreto seja descarregado (aplicado) completamente em 150 min.
Potência instalada	CV	20CV	Verificação no projeto preliminar	Alto consumo de energia	Quanto maior o a potência de funcionamento da máquina, maior os

Nº. de comandos para executar a impressão	Nº	10	Verificação no projeto preliminar	Ser complexo de operar	
Taxa corrosão uniforme	mm/ano	0,1mm/ano	Informações dos usuários	A máquina sofrer corrosão	Garantir que a estrutura tenha corrosividade moderada de acordo com NACE RP-07-75 (2013)
Nº. de materiais para impressão	Nº	3	Verificação no projeto preliminar	Variação de clima prejudicar o traço do material	Devido à dimensão do Brasil, a região tem perfil climático diferente o que interfere diretamente no traço do material para atender as normas ABNT NBR 6118:2003 (Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento) e NBR 12655:1996 (Concreto – Preparo, Controle e Recebimento)
Nº. Componentes disponíveis no mercado local	%	50%	Verificação no projeto preliminar	Ter alto custo de fabricação e dificuldade para manutenção	
Resistência do concreto	Mpa	35MPa	Ensaio de corpo de prova	Ter valores de resistência inferiores ao da norma	Estar em acordo com a norma NBR 6118
Nº. de fornecedores que atendem a ISO 9001	%	80	Verificação no projeto preliminar	A máquina ter baixa durabilidade e ou quebrar em operação	Garantir que o fornecimento de bens e serviços seja consistente e conforme as especificações
Memória de armazenagem de dados	TB	1TB	Verificação no projeto preliminar	Máquina não receber comandos remotamente	Devido ao perfil de um canteiro de obras o painel de operação não deve ficar conectado a máquina em operação. Sendo a operação remota uma restrição.

Anexo 2 – Visita técnica à TECRON Pré-moldados

A equipe da InovaHouse3D visitou a indústria de pré-moldados TECRON, em Luziânia – Góias, com apoio da ABCP, no dia 05 de maio de 2016 (figura 57). A motivação da visita se deu pela mudança do cliente alvo do modelo de negócios da startup. Focando até o momento em oferecer uma máquina para utilização e otimização do processo construtivo nos canteiros de obra, os clientes alvo eram as construtoras e incorporadoras.

Compreendemos que a implantação da tecnologia de impressão de concreto na construção civil tem maior potencial de sucesso se utilizada nas indústrias de pré-fabricados ao invés de ser implementada diretamente no canteiro de obra por construtoras ou incorporadoras. Ou seja, em termos de modelo de negócio, a Inova fez uma modificação no cliente, tendo agora as indústrias de pré-fabricado como cliente (usuário final).

O fortalecimento da indústria de pré-fabricado favorece diretamente industrialização do setor construtivo e, em consequência, gera o aumento da produtividade e redução da dependência de mão de obra.

Com objetivo de identificar pontos de melhoria e otimização no processo de produção de elementos pré-fabricados, conhecemos a produção de lajes alveolares com sistema de protensão, a produção e montagem de formas e moldes para vigas e pilares, observamos a montagem e alocação da armação nos moldes. Também visitamos o laboratório para análise de material, ensaio de corpo de prova, e a fabricação de blocos de concreto, desde a inserção dos materiais brutos a curagem do bloco, feita em uma estufa.

Durante a visita, foram levantados dados técnicos do processo de fabricação e oportunidades de negócio. Para concluir este relatório estão listadas as observações técnicas e sugestões.



Figura 57 – Integrantes da InovaHouse3D, ABCP e TECRON (Fonte: autora)

Observações técnicas

A produção de lajes alveolares na TECRON é composta por:

- Sistema de protensão (figura 58 e 59)
- Extruder WCH
- Caçamba dosadora de concreto (figura 60)
- Máquina de corte
- Operadores

Sistema de protensão

Protender uma estrutura de concreto, é fazer uso de uma tecnologia inteligente, eficaz e duradoura, que permite várias características, como:

- Grandes vãos e sobrecargas.
- Controle e redução de deformações e de fissuras.
- Possibilidade de uso em ambientes agressivos.
- Projetos arquitetônicos ousados.
- Aplicação em peças pré-fabricadas.
- Recuperação e reforço de estruturas.
- Lajes mais esbeltas do que as equivalentes em concreto armado: podendo reduzir a altura total de um edifício, como seu peso e carregamento de suas fundações.



Figura 58 – Produção de lajes alveolares na TECRON (Fonte: autora)

Extruder

A máquina utilizada pela empresa foi adquirida em 2014 por 500 mil reais e não está mais no catálogo da fabricante. O extruder comercializado pela WCH no momento é o EX203, cujas especificações estão listadas abaixo.

A aquisição de máquinas e tecnologias foi apontada pela empresa como investimento necessário e sempre realizado, exceto em momento de crise econômica como o cenário atual. A empresa faturava em média 16 milhões em 2014 e este ano tem apenas um contrato totalizando 1 milhão. Foi comentado com o engenheiro responsável pela empresa o valor de 1 milhão de reais como custo da possível máquina de impressão 3D e a reação foi positiva, considerando o valor baixo e acessível.



Figura 59 – Utilização de equipamento na indústria de pré-fabricado (Fonte: autora)

Extruder EX203, equipamento de alta produtividade, aplicado na produção dos elementos Pré-Fabricados protendidos. Permite a produção de painéis/lajes alveolares utilizando uma única Unidade Motriz - UM203 e diversas Unidades de Compactação (UC) para alturas de 16, 18, 20, 26, 32 e 40cm.

A compactação do painel é feita com moderno processo de roscas sem fim, que prensam e vibram o concreto, resultando em velocidade contínua. As Unidades de Compactação, são pré-reguladas, proporcionando maior agilidade nas substituições dos perfis (alturas) e maior redução do tempo improdutivo da máquina.

Principais características:

- Produtividade de até 120 m² /hora.
- Painéis de 37% a 50% de vazio.
- Concreto seco (slump zero), resultando em Pré-Fabricados de altíssima resistência (70 - 75 mpa / 8500-9300 psi).
- Compactação homogênea através de regulação eletrônica e individual da velocidade das roscas, que pode ser ajustada facilmente durante a produção.

- Nível de ruído reduzido.
- Versatilidade e rapidez para produção de diferentes alturas.
- Grande Economia de concreto com redução no consumo de cimento por m³.
- Pouca mão-de-obra, apenas um operador.
- Nível de ruído reduzido.

Caçamba Dosadora de Concreto

Caçambas projetadas para transporte e dosagem de concreto para máquinas e fôrmas com abertura para descarga automática, gradual e giratória para concreto auto adensável.



Figura 60 – Caçamba dosadora de concreto (Fonte: autora)

Considerações:

- Avaliar o funcionamento do bico extrusor, considerando a utilização de um sistema similar ao de um pistão ou êmbolo.
- Redução de armadura nas estruturas pode ser feita ao incluir aditivos no concreto, como por exemplo, fibra de vidro. Avaliar as alterações no comportamento e trabalhabilidade do material com fibra de vidro.
- Maior dificuldade relatada pela empresa: lidar com pessoas - mão de obra pouco especializada e de nível social cultural pouco favorecido. Esta é uma oportunidade de negócio, onde a automatização dos processos visa reduzir número de operadores, satisfazendo a necessidade mais urgente do cliente.

- Alto volume de perda de formas, devido à customização dos projetos e variação de esforços a qual o elemento estará submetido, também é uma oportunidade de negócio. A utilização de tecnologia 3D para produção de elementos pré-fabricados não necessita de moldes e elimina a geração de resíduos e desperdício de material.

obs: A forma muda para cada resistência da estrutura, um prédio de 3 andares tem uma laje com resistência diferente no 1º pavimento da laje do 1º pavimento de um prédio de 23 andares, ou seja, os projetos exigem quase sempre novas formas.