



Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Bacharelado em Engenharia Mecânica

Danilo Gomes Vitória

**CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE IMPRESSORA 3D
PARA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Cruz das Almas

2022

Danilo Gomes Vitória

**CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE IMPRESSORA 3D
PARA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso do Bacharelado em Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito para obtenção do grau de Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ivanoé João Rodowanski

Cruz das Almas

2022

DANILO GOMES VITÓRIA

**CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE IMPRESSORA 3D
PARA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso do Bacharelado em Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito para obtenção do grau de Engenharia Mecânica.

Aprovado em ___ de março de 2022.

Prof. Dr. Ivanoé João Rodowanski
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Orientador

Prof. Dr. Renê Medeiros de Souza
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Avaliador 1

Prof. Msc. Vanio Vicente Santos de Souza
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Avaliador 2

“As verdadeiras conquistas, as únicas de que nunca nos arrependemos, são aquelas que fazemos contra a ignorância.” - Napoleão Bonaparte

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e por me permitir ter chegado até aqui. Agradeço a minha família que sempre acreditou no meu potencial, sempre investiu em mim e trabalhou duro para me dar o melhor. Eu nunca teria chegado tão longe sem eles, obrigado por me ajudar quando eu mais precisei e por todo o apoio.

Agradeço à minha namorada, Sueid, que me apoiou desde o início e contribuiu com este trabalho. Obrigado pela compreensão e aprendizado ao longo dos últimos cinco anos.

Aos meus colegas do BCET e da Engenharia Mecânica que foram parte integrante do meu percurso. Agradeço-lhes pelo suporte, a partilha de conhecimento e a motivação diária.

Agradeço também ao meu orientador, Prof. Ivanoé João Rodowanski, por me incentivar a escolher essa área, por todo conhecimento adquirido ao longo da trajetória acadêmica e me acompanhar durante todo o projeto de pesquisa.

Resumo

O uso cotidiano da impressão tridimensional vem crescendo e se ramificando em áreas anteriormente não exploradas nesse setor, diversificando entre impressões de tecidos do corpo humano até edificações. Há em todo mundo uma corrida tecnológica a fim de desenvolver máquinas de impressão 3D cada vez mais eficientes, levando em consideração países como a China onde esse tipo de impressão desempenha uma grande referência em termos de técnicas de impressão e pesquisas, o Brasil apresenta resultados promissores em tecnologias ainda em desenvolvimento, mas que demonstram um grande potencial. *Home Printer* é um projeto que teve seu início em 2019 com o propósito de desenvolver um protótipo de impressora 3D capaz de imprimir um segmento de parede. O referido projeto introduz ao Recôncavo da Bahia uma tecnologia inovadora. Tratando-se de um projeto complexo que envolve vários setores da engenharia, foi dividido em quatro etapas onde; inicialmente foi desenvolvido de forma virtual os mecanismos da impressora com base na modelagem geométrica, a segunda etapa se baseou na montagem física usando o modelo virtual como guia, em seguida na terceira etapa foram realizadas simulações computacionais com base em rotinas CNC, e por fim a implantação do material eletrônico um conjunto de sensores e placas controladoras especificados nas pesquisas preliminares. A proposta inicial utilizaria argamassa polimérica como matéria prima sendo possível a exploração de outros materiais de fácil obtenção, destacando-se produtos resultantes da reciclagem. Com o êxito na impressão do seguimento de parede as características mais marcantes do protótipo poderão ser avaliadas e alteradas no intuito que torne possível a construção em escala real de uma estrutura capaz de realizar a impressão de uma edificação inteira. Confeccionada nos laboratórios de automação e materiais da construção da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, a construção desta impressora a partir de um baixo orçamento foi possível graças ao aproveitamento de peças remanescentes de antigos projetos, estas foram manipuladas em ambiente virtual para adequar às necessidades da impressora. Espera-se com este trabalho realizar a impressão de um segmento de parede e com isso o surgimento de novas pesquisas e parcerias, que venham somar na busca de aperfeiçoamento do projeto no intuito de que sejam produzidas máquinas com capacidade de produzir edificações para o mercado com qualidade, velocidade e baixo custo.

Palavras chave: *Automação, CNC, Alvenaria.*

Abstract

The everyday use of printing growing and branching into previously unexplored areas in this sector, diversifying even three-dimensionally comes between impressions of human body tissues. There is the whole purpose of developing a technological machine to develop an increasingly efficient printing in the world, where this type of consideration is considered as a great reference in terms of printing in Brazil and printing results, promissory notes in developing technologies, but which still has great potential. Home is a project that started in 2019 with the purpose of developing a wall capable of printing a 3D printing segment. This project introduces an innovative technology to the Recôncavo da Bahia. Dealing with a complex project that involves several engineering sectors, it was divided into four stages where; The printer mechanisms were initially developed in a virtual way based on the modeling in the second assembly in the second physical assembly using the virtual model as a guide, then computer simulations were made based on CNC routines and then finally the implementation of the electronic material a set of sensors and controller boards specified in the preliminary surveys. The initial proposal of using polymeric mortar as raw material is possible from other materials of easy operation, highlighting the products resulting from recycling. With the success in printing the construction as the most striking features of the structure and changes in the construction of a wall entirely capable of carrying out the construction of a wall. Made in the automation and construction materials laboratories of the Federal University of Recôncavo da Bahia, the construction of this printer from a low budget was possible to use the remaining parts of old projects, these were manipulated in a virtual environment to adapt sometimes the printer . It is expected that the work will be carried out with the research segment and with that, the project does not aim to search for new research and partnerships with the objective of improving the functioning of the research segment for the market with the ability to carry out operations research or market with quality, speed and low cost.

Keywords: *Automation, CNC, Masonry.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Fluxograma da metodologia.	20
Figura 2. (A) Representação de uma máquina CNC Prismática. (B) Representação de um sistema de movimentação Core XY. (C) Representação de um sistema de movimentação Delta.	21
Figura 3. (A) Perfil modelo V-Slot. (B) Montagem virtual com as peças modeladas.	22
Figura 4. (A) Modelagem do perfil móvel. (B) Vista ampliada da fixação dos roletes no perfil.	23
Figura 5. Modelagem do sistema de movimentação X, Y e Z.	24
Figura 6. Implementação dos motores, polias e correias no sistema de deslocamento X e Y.	25
Figura 7. (A) Motor de passo e conjunto de engrenagens aplicadas para movimentação do eixo Z. (B) Cremalheira com sistema de encaixe.	26
Figura 8. Mecanismo de funcionamento do eixo Z com todos os componentes.	27
Figura 9. Estrutura mecânica fixa aos suportes.	27
Figura 10. Verificação de resistência de toda a estrutura.	28
Figura 11. Modelagem completa da impressora 3D de edificações.	29
Figura 12. Montagem da estrutura externa metálica.	29
Figura 13. (A) Montagem do perfil móvel. (B). Motor de passo 23LM-K005-20.	30
Figura 14. (A) Impressão da polia dentada. (B) Sistema de transmissão completo com as polias e correia.	30
Figura 15. Mecanismos de translação do eixo X.	31
Figura 16. (A) Alocação dos componentes de deslocação em Z no perfil do carro móvel. (B) Engrenamento dos componentes internos.	32
Figura 17. Estrutura mecânica completa.	33
Figura 18. (A) Resultado do ensaio de compressão. (B). Resultado do ensaio de deslocamento.	36
Figura 19. Circuito montado com Arduino, drivers e motores.	37
Figura 20. Resultado final da simulação da movimentação de cada eixo, extraído através do código G.	38
Figura 21. Material eletrônico para impressora de edificações.	39
Figura 22. Placa de Arduino Mega 2560.	40
Figura 23. Drivers A4988.	40

Figura 24. (A) Circuito externo montado para comunicação entre a placa de Arduino e o driver A4988. (B) RAMPS e fazendo as conexões entre os drivers diretamente do Arduino.	41
Figura 25. Fonte chaveada 12 Volts 30 Amperes.	42
Figura 26. Display LCD controlador gráfico RepRap.	42
Figura 27. Montagem do conjunto eletrônico.	43
Figura 28. Site oficial da companhia Marlin.....	43
Figura 29. Motor de passo Pm551-048-hp69 e datasheet.	44
Figura 30. Cálculo e ajuste da tensão de referência por intermédio de um multímetro.....	45
Figura 31. Tabela de micropassos.	46
Figura 32. Configuração manual de micropassos (1 1 1), onde todos os pinos foram conectados.	47
Figura 33. Tela inicial do Marlin compilada na placa do Arduino.	48
Figura 34. Identificação das bobinas no motor teste.	49
Figura 35. Demarcação da área útil para impressão.	51
Figura 36. Configuração dos parâmetros de impressão no software fatiador Ultimaker Cura.	52
Figura 37. Erro E1: Temperatura Mínima.....	52
Figura 38. Elementos do HOTEND.	53
Figura 39. Loop de aquecimento na tela de impressão.	54
Figura 40. Potenciômetro de 10k ohms adotado.	55
Figura 41. Registro de temperatura feito pela alteração da resistência do potenciômetro durante uma simulação de impressão.	55
Figura 42. Push buttons adotados como fins de curso.	56
Figura 43. Modelagem dos suportes e posicionamento adequado dos fins de curso.	57
Figura 44. Cabo de rede Ethernet utilizado para as ligações.	58
Figura 45. Dimensionamento do tamanho dos cabos com o software de modelação.	59
Figura 46. Máquina de moer carne responsável pela extrusão da argamassa.	59
Figura 47. Mecanismo de extrusão da argamassa.	60
Figura 48. Esquema elétrico com as ligações correspondentes do motor 23LM-K005-20. ..	61
Figura 49. Ajuste manual do trimpot para 0,768 Volts.....	62
Figura 50. Verificação de movimento com os motores de passo.....	63
Figura 51. Fins de curso anexados na posição home (0,0,0).....	64
Figura 52. Vista superior do carro móvel, limitado o deslocamento da haste centralizada em seu interior.....	65

Figura 53. Mesa de impressão e estrutura de elevação.	66
Figura 54. Configuração manual dos passos por milímetro.	67
Figura 55. Simulação de impressão.	67
Figura 56. Geometria do segmento de parede fatiado.	68
Figura 57. Sistema completo para impressão do segmento de parede.	69
Figura 58. Argamassa cimentcola interno QUARTZOLIT, pacote com 20 quilos.	70
Figura 59. (A) Mecanismo de extrusão da argamassa. Figura 59. (B) Mecanismo alternativo para extrusão da argamassa.	71
Figura 65. Mecanismo secundário de extrusão da argamassa.	72
Figura 66. Camada única do segmento de parede com uma massa de proporção 3 partes de argamassa para uma e meia de água.	73
Figura 67. Camada única do segmento de parede com uma massa de proporção 4 partes de argamassa para uma de água.	73
Figura 68. Cabo de um HD IDE adaptado para a entrada do display.	74
Figura 69. Camada única do segmento de parede com uma massa de proporção 3 partes de argamassa para uma de água.	75
Figura 70. Segmento de parede com a sobreposição de camadas.	76
Figura 71. Utilização do maçarico para remoção parcial da umidade a fim de sobrepor mais camadas	76
Figura 72. Primeira versão do segmento de parede impresso com o processo de extrusão manual.	77
Figura 73. Deposição dupla da argamassa.	78
Figura 74. Medição do resultado impresso.	79
Figura 75. Medição de 5 milímetros por camada.	79
Figura 76. (A) Medição prática do comprimento do segmento de parede com 46.5 milímetros. (B) Medição prática da largura do segmento de parede com 26.5 mm.	80

LISTA DE SIGLAS

3D - Três dimensões.

CNC - Computer Numeric Control - Controle Numérico Computadorizado.

CNPQ - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

CAD - Computer Aided Design - Desenho assistido por computador.

CAM - Computer-Aided Manufacturing - Manufatura assistida por computador.

FDM - *Fused Deposition Modeling* - modelagem por fusão e deposição.

PLA é um Ácido Polilático. Consiste em um polímero biodegradável extraído de fontes naturais, como o amido de milho e raízes da mandioca.

ABS - Acrilonitrila Butadieno Estireno.

LCD - Liquid Crystal Display - Tela de cristal líquido.

STL - Standard Triangle Language - Linguagem padrão por triângulos.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	13
1.1 MOTIVAÇÃO	13
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 OBJETIVO GERAL	14
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3. METODOLOGIA E APLICAÇÃO	18
3.1 MODELAGEM GEOMÉTRICA DA ESTRUTURA E MECANISMOS.....	20
3.2 MONTAGEM DA ESTRUTURA FÍSICA COM BASE NO MODELO 3D.....	29
3.3 SIMULAÇÃO DOS ELEMENTOS ELETRÔNICOS/ COMPUTACIONAIS.	33
3.3.1 SIMULAÇÃO DE DEFORMAÇÃO E RESISTÊNCIA DO SEGMENTO DE PAREDE VIRTUAL	34
3.3.2 SIMULAÇÃO DE IMPRESSÃO USANDO ELETRÔNICA DIGITAL.....	37
3.4 IMPLANTAÇÃO DO MATERIAL ELETRÔNICO E PRIMEIROS TESTES DE DESLOCAMENTO.....	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
5. CONCLUSÃO	81
6. SUJESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
ANEXO 1 – Linhas de códigos.....	89
APÊNDICE 1 - Lista de materiais utilizados.....	92

1.INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O crescimento da população e o desenvolvimento tecnológico aumentaram as buscas por alternativas cada vez mais rápidas e eficientes na construção civil. Ainda que avanços tecnológicos em relação aos materiais da construção venham se desenvolvendo, o método de construção tradicional onde existe a necessidade da atuação direta do trabalhador na forma de mão de obra braçal para execução das obras se torna obsoleto quando comparado a outros setores da engenharia onde a presença da automação é evidente. Segundo FARIAS (2013), no Brasil a construção civil ainda é marcada por utilizar técnicas consideradas artesanais e com enormes desperdícios.

Nas obras da construção civil, por meio dos métodos convencionais de alvenaria, são verificados uma série de desperdícios relacionados à retrabalho principalmente por erros de execução, por falta de controle técnico, qualidade insuficiente no processo, treinamento e análises de risco. Para revolucionar este campo, a impressão 3D vem inovando para melhorar alguns dos problemas que envolvem a construção civil. A impressora 3D para edificações é responsável pela parte estrutural, é realizada de forma automatizada e com maior precisão, reduzindo as falhas e custos do projeto (GARDNER, et al, 2013).

Além das questões técnicas, o uso da impressão 3D na construção civil favorece também as questões ambientais, prometendo reduzir expressivamente os desperdícios de materiais e energia durante o processo. Outro fator vantajoso é que não há excesso de ruídos, poeira, emissão de resíduos e de substâncias prejudiciais. (MENEZES, 2020).

Segundo PORTO (2016), a indústria da construção também é conhecida por ser uma das mais perigosas do mundo, com demasiados acidentes de trabalho e o que mais uma vez justifica a intervenção de uma máquina, oferecendo maior segurança para os trabalhadores envolvidos já que trata-se de um processo automatizado com maior controle do processo produtivo.

Maio de 2021, o custo do metro quadrado na construção civil brasileira foi de R\$ 1.387,73, em média, segundo o Índice Nacional da Construção Civil (INCC/Sinapi). Desse total, R\$ 810,08 correspondem aos custos dos materiais e R\$ 577,65 correspondem ao custo da mão de obra – considerando a desoneração da folha de pagamento. (ESTATÍSTICAS ECONÔMICAS, 2021).

Usando como parâmetro os dados referentes a um projeto de impressora de edificações feito por um grupo de engenheiros brasileiros, o 3D HomeConstruction em 2020 ergueu uma casa de 68 metros quadrados por meio da manufatura aditiva, onde o valor do metro quadrado foi estimado a 50 reais com tendência de abaixar ainda mais. (MARTINELLI, 2020).

Em contrapartida aos benefícios oferecidos, existem diversas implicações que dificultam a popularidade e alta adesão no mercado comercial desse tipo de tecnologia, a principal é a necessidade de um alto investimento.

O presente trabalho busca incentivar o surgimento de novas pesquisas e parcerias, que venham somar no aperfeiçoamento da impressora, para que assim sejam produzidas máquinas com capacidade de produzir edificações para o mercado com qualidade, velocidade e baixo custo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo a construção de uma máquina CNC a baixo custo voltada para a impressão 3D de segmentos de parede usando argamassa.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estudar a viabilidade da impressão de uma edificação por meio da impressão de um trecho simples de parede, onde se espera validar os resultados teóricos apresentados por simulações realizadas em ambiente virtual.

Mostrar quais metodologias apresentam resultados positivos e negativos,

Apontar quais as dificuldades encontradas nessa pesquisa e os desafios que precisam ser superados para o sucesso de um protótipo em maiores proporções.

Imprimir segmento de parede por meio da sobreposição das camadas de argamassa.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo apresenta a motivação para a realização deste trabalho, aborda sobre os objetivos e a sua estrutura.

O segundo capítulo é a contextualização sobre o tema, explicando sobre a impressão 3D de maneira geral, quais são suas aplicações e vantagens na área da construção civil. Além de descrever sobre as metodologias que foram usadas e que foram utilizadas como parâmetros no estudo deste trabalho.

O terceiro capítulo relata qual foi o método utilizado para a realização do trabalho, quais os materiais e as peculiaridades referentes ao procedimento.

No quarto capítulo aborda sobre os resultados encontrados durante o tempo em estudo sobre o tema, com uma explicação sobre as metodologias utilizadas. Também estão relatadas as dificuldades encontradas durante o processo de realização do trabalho e quais foram os potenciais objetos de estudo para o sucesso da pesquisa.

No quinto e último capítulo retrata as considerações finais sobre o trabalho e sugestões para projetos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A impressão tridimensional apesar de grande exposição nos últimos anos, surgiu por volta de 1970 a partir da união dos campos de estudos da topografia e da foto-escultura, já sua primeira utilização comercial voltada para a construção de modelos e protótipos, etapa do processo de desenvolvimento de produtos para a fabricação em série, veio em 1987 pela empresa 3D Systems, que desenvolveu um sistema onde utilizava uma resina fotossensível que era solidificada ao ser exposta a uma luz ultravioleta, chamada de estereolitografia ou *Stereolitography Apparatus* (SLA). (TAKAGAKI, 2012).

A impressão tridimensional é uma tecnologia que transforma os projetos digitais em objetos que são tangíveis, ocorre através de um processo de fabricação aditivo em que a máquina é controlada por um computador e através do depósito de camadas acumuladas por um determinado material, estas sobrepõem-se até formar o modelo desejado. (DICOMP, 2018).

Recentemente a *startup* americana Organovo, "bio-imprimiu" (3D) seu primeiro tecido de fígado humano para testes, depois em 2010 usaram uma técnica inovadora para "bio-imprimir" o primeiro vaso sanguíneo humano, esperando que nos próximos 10 anos haja condições concretas de "bio-impressão" de órgãos completos. (BERNARDES, 2017).

Um bom exemplo da aplicação da impressão 3D na construção civil aconteceu na China em 2015, onde um edifício de cinco andares foi concebido pelo uso de impressora 3D, sem a ajuda de outro tipo de ferramenta. Para a realização desse empreendimento foi preciso contar com uma impressora de grandes proporções (6,6 metros de altura, 10 metros de largura e 40 metros de comprimento). Com esse equipamento robusto de impressão 3D foi possível realizar todos os contornos do edifício e ainda fabricar todas as peças inerentes à sua montagem. (TECHTUDO, 2015).

No contexto da construção civil, essa tecnologia traz benefícios significativos e tem o propósito de reduzir o tempo de realização do projeto, na economia de materiais e redução de acidentes devido a sua automatização, além de questões ligadas à sustentabilidade com uma menor taxa de desperdício (PORTO, 2016).

Apesar de a evolução tecnológica nessa área ser um pouco mais lenta que em outros setores, a impressão 3D na construção indica que será uma revolução nesse mercado, afirma o estudo desenvolvido por Romain de Laubier, Seven Withöft e Christoph Rothballer, os executivos do The Boston Consulting Group (BCG). (CELERE, 2018).

Em países desenvolvidos como Emirados Árabes e Estados Unidos esse cenário já é uma realidade, segundo uma pesquisa americana no setor da SmarTech, a indústria da construção impressa em 3D saltará para 40 bilhões de dólares até 2027 (ENGETAX, 2019). No Brasil, nas construções de edificações ainda existem fatores limitantes, como a necessidade de alto investimento na tecnologia, entretanto muitas empresas utilizam a impressão 3D para a prototipagem, isto é, a criação de maquetes para projetos na construção civil. (UNIVERSIDADE TRISUL, 2020).

Um dos maiores desafios para expandir o mercado da impressão 3D no setor civil é a necessidade de alto investimento, por tratar-se de uma inovação tecnológica e ainda em estudo, a implantação de uma impressora 3D em um canteiro de obra pode ser avaliada entre quinhentos mil a dois milhões de dólares (AUTODOC, 2019). Além de questões técnicas como a regulamentação para o uso da manufatura aditiva em substituição a alvenaria tradicional.

Apesar dos obstáculos o mercado da impressão 3D está em desenvolvimento no mundo inteiro, as pesquisas e aplicações nessa área vem produzindo resultados favoráveis em diversos aspectos do processo e possui um verdadeiro potencial econômico, social e ambiental. (PACHECO, 2017).

Um dos maiores desenvolvedores de estudo dessa tecnologia é o projeto *Contour Crafting*, que tem como líder o professor Behrokh Khoshnevis, da Universidade do Sul da Califórnia, nos Estados Unidos. Seus estudos demonstram que existe a capacidade de imprimir uma casa em até 20 horas e já vem sendo desenvolvido casas até para solo lunar, com a parceria da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). (FLORÊNCIO et al., 2016).

As camadas construtivas são o princípio básico da impressão 3D, pois ela consiste na fabricação de uma peça a partir da deposição de um determinado material em camadas sobrepostas repetidas vezes até que se tenha a peça completa. (TAKAGAKI, 2012). A tecnologia pode ser utilizada em várias esferas do setor, inclusive na construção de habitação inclusiva e social. Outra área interessante é a inovação em materiais, expandindo para a utilização de materiais reciclados e locais.

O método utilizado para imprimir utilizando o concreto é análogo ao que a impressora 3D faz usando o polímero. Primeiro, é necessário ter o modelo 3D desejado em um software de modelagem tridimensional, e logo depois, transformar para camadas através de um software “fatiador”, onde será determinado a quantidade dessas camadas e a espessura para o modelo. Essa informação é enviada para a impressora 3D, que será responsável por ler e interpretar o código G que foi gerado pelo fatiador, e a partir disso segue na construção das camadas. (FLORÊNCIO et al., 2016).

Os métodos de construção de uma edificação em sua maioria necessitam de uma forma, armação e concreto para materializar um projeto. Já nas impressoras 3D acontece por meio da divisão em várias camadas do que será impresso de baixo para cima e, por meio da sobreposição delas. Esse controle na deposição do material de forma que o resultado saia como o esperado se dá por sequências de linhas de códigos. O código G implementado é uma linguagem padronizada para sistemas de comando numérico computadorizados. É responsável por instruir a máquina qual sequência realizar de acordo com a tarefa desejada, o programa então executa linha por linha até o final do código. (POLI NÁUTICO, 2020).

Criado para controlar máquinas via computador, é comum associarmos o termo CNC à máquinas de usinagem, mas assim como estas, impressoras 3D também fazem uso do CNC. Dessa forma este trabalho tem por objetivo, desenvolver um protótipo de pequeno porte para impressão 3D de paredes de argamassa polimérica utilizando para isso a técnica de Comando Numérico Computadorizado (CNC).

Responsável pela grande quantidade de entulho produzido pelas obras e uma alta emissão de gases, o processo tradicional de construção em termos de sustentabilidade fica para trás quando comparado com a impressão de edificações. Além de apresentar baixas emissões de carbono, possui uma considerável redução nas sobras das construções. Utilizando como matéria prima materiais reciclados ou mais avançados tecnologicamente, como o concreto capturador de CO₂ e o concreto reciclado feito a partir do entulho gerado. Uma edificação impressa também apresenta melhores condições térmicas para o ambiente externo com um menor consumo energético durante sua construção. Em um futuro espera-se desperdício zero. (KHOSHNEVIS, 2012).

3. METODOLOGIA E APLICAÇÃO

Incluso no CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) como um projeto contemplado com bolsa de iniciação científica, as pesquisas e atividades foram desenvolvidas em sua totalidade no Laboratório de Automação e Materiais de Construção do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia.

A problemática em questão foi elaborar com materiais acessíveis, uma estrutura na qual permite movimentos tridimensionais. E também a respeito da sobreposição do material impresso, que diferente dos termoplásticos (usados como filamentos nas impressoras convencionais) a argamassa polimérica como matéria prima de impressão não apresenta a propriedade da solidificação “instantânea”, necessitando de um tempo de cura.

Assim é aberto uma diversidade de áreas de estudo para a execução completa do projeto, incorporando aspectos mecânicos (referentes a física estrutural da impressora), aspectos relacionados à construção civil (referente ao material de impressão e ao formato estrutural) e aspectos elétricos/eletrônicos/computacionais (referentes a distribuição, alimentação e automação dos elementos elétricos).

Assim, nesta pesquisa foi possível estudar por meio da elaboração de um protótipo a baixo custo a viabilidade da construção em grande escala de uma impressora 3D para edificações, como também ter parâmetros dos possíveis erros e melhorias que deverão ser

implementados no protótipo real. É importante ressaltar a relevância desse projeto na comunidade acadêmica para o desenvolvimento da tecnologia na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, localizada em Cruz das Almas, Bahia, através de projetos futuros e para a aplicação em diversas áreas do conhecimento.

Para dar início ao projeto foram coletadas informações relevantes para o presente estudo e quais as tecnologias seriam empregadas para o desenvolvimento do trabalho. Assim, houve o período de contextualização para compreender a tecnologia necessária e a melhor possibilidade para que se adequasse às necessidades dessa pesquisa. Após revisão bibliográfica através de monografias, dissertações, sites e mídias eletrônicas referente a impressão 3D para edificações, foi possível montar uma linha de raciocínio com uma ordem cronológica daquilo que seria necessário para realização do projeto.

A primeira etapa foi realizar um levantamento do material a ser utilizado, sucatas e peças de antigos projetos de movimentação tridimensional. Com esse material foi possível construir em ambiente virtual por meio da modelagem geométrica uma impressora, na qual o protótipo se espelharia, possibilitando com o modelo virtual a realização de simulações de movimentação e evitando imprevistos e retrabalho durante a montagem física do protótipo.

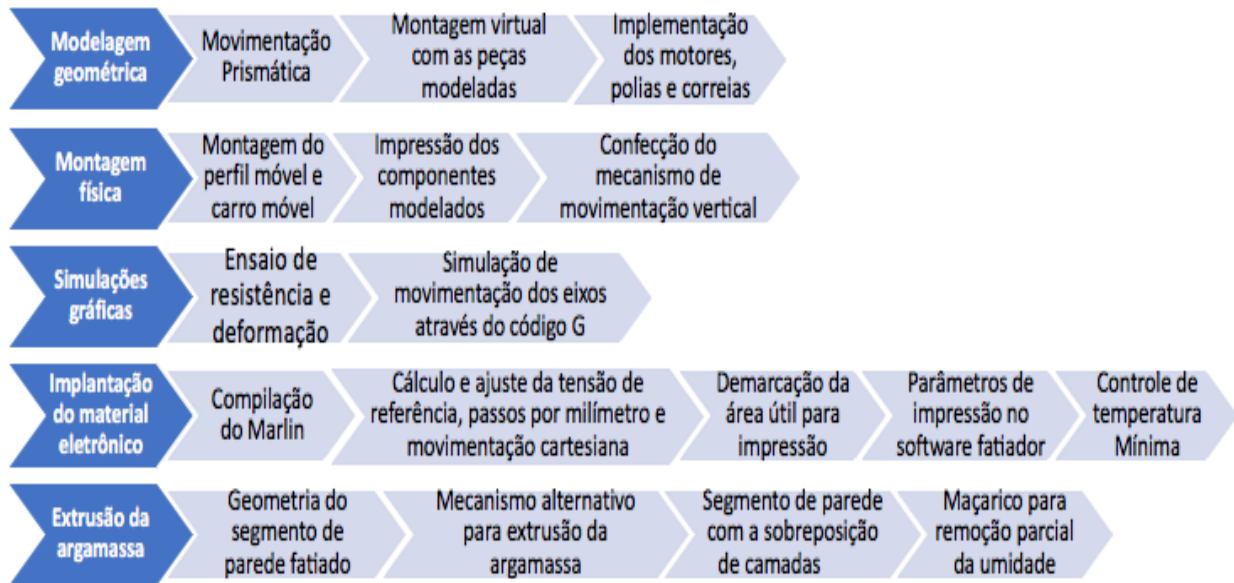
A segunda etapa foi a construção física da estrutura mecânica de acordo ao modelo desenvolvido em ambiente CAD, ao final desta etapa foi possível obter com materiais reaproveitados uma máquina com aproximadamente 1 metro quadrado capaz de realizar movimentos prismáticos nos três eixos cartesianos X, Y e Z.

A terceira etapa consistiu em realizar simulações virtuais com a eletrônica definida. Foi escolhido trabalhar em um ambiente de prototipagem livre qual enviaria a drivers controladores os comandos para a máquina se movimentar corretamente. No entanto, a fim de evitar contratemplos e introduzir conceitos de programação CNC, de modo análogo como ocorreu na montagem do conjunto mecânico foi necessário realizar simulações em softwares específicos para o desenvolvimento eletrônico e computacional.

A última etapa foi a implantação do material eletrônico juntamente com os códigos do modelo geométrico do seguimento de parede a ser impresso, em seguida realizar os testes e ajustes mecânicos de movimentação dos eixos, por fim realizar a impressão das camadas que compõem o segmento de parede.

Abaixo pode-se verificar o fluxograma da metodologia utilizada no trabalho, Figura 1.

Figura 1. Fluxograma da metodologia.



Fonte: Autoria própria (2022).

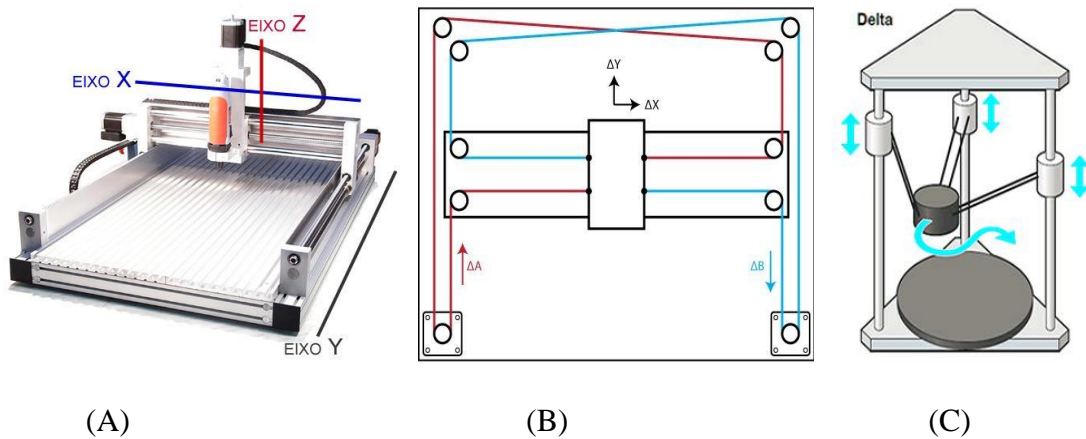
A seguir são apresentadas as metodologias utilizadas para a realização do presente trabalho.

3.1 MODELAGEM GEOMÉTRICA DA ESTRUTURA E MECANISMOS.

Na etapa inicial, após um levantamento bibliográfico a respeito das máquinas CNC e impressoras 3D foi necessário definir para iniciar o projeto o tipo de estrutura a ser construída dentre a grande diversidade encontrada no mercado. Os sistemas de movimentação espacial comumente encontrados são:

Sistema de movimentação prismática. Nesse grupo de máquinas cada eixo cartesiano X, Y e Z possui um motor individual responsável pelo deslocamento apenas do seu eixo, Figura 2-A. Outro sistema de movimentação é o Core XY, nesse grupo existem dois motores acoplados responsáveis em conjunto pelo deslocamento de X e Y, para Z existe um motor individual, Figura 2 (B). Por fim existe também o sistema de movimentação delta no qual os 3 eixos estão conjugados exigindo um grau de configuração superior aos demais, Figura 2 (C).

Figura 2. (A) Representação de uma máquina CNC Prismática. (B) Representação de um sistema de movimentação Core XY. (C) Representação de um sistema de movimentação Delta.



Fonte: Clube CNC Brasil (2013). **Fonte:** Kerry Stevenson (2020). **Fonte:** AL3DAN 3D (2018).

Após analisado cada um dos mecanismos, foi definido construir uma estrutura mecânica que realizasse movimentos prismáticos, com uma mesa de impressão fixa assim como a maior quantidade possível de componentes, uma vez que seria um maquinário relativamente grande em comparação com outras impressoras 3D. Ocupando aproximadamente 1 metro quadrado, esta transportaria internamente um fluxo constante de argamassa líquida, uma matéria prima mais densa que os filamentos plásticos comumente usados nas máquinas de impressão 3D.

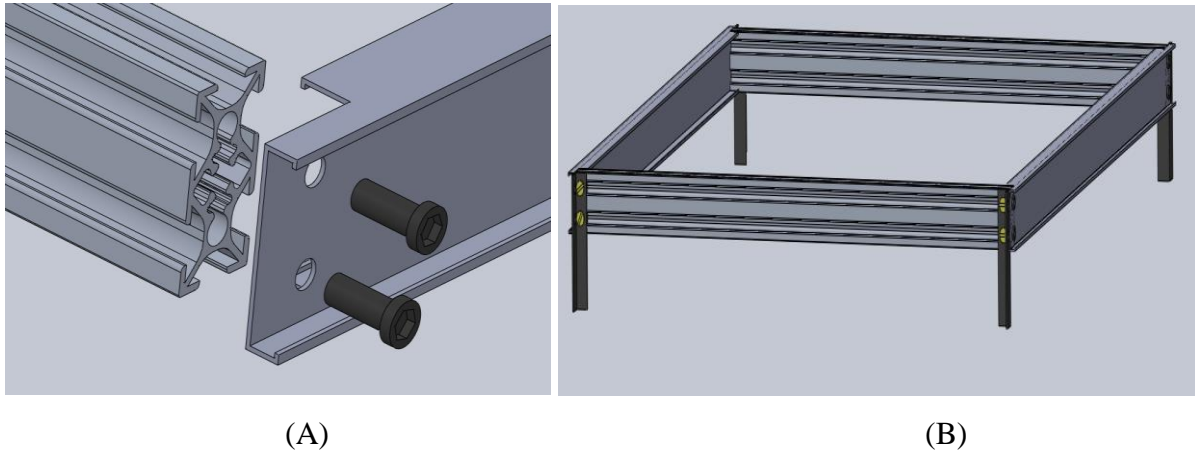
O próximo passo foi recolher os materiais que tornassem possível a construção da máquina, e como o intuito seria construir um protótipo a um baixo custo, foram reaproveitadas algumas sucatas metálicas e peças de antigos projetos de movimentação tridimensional para a construção.

Dessa forma com as peças reunidas, ao contrário de partir diretamente para montagem, devido a complexidade do projeto seria necessário construir um modelo virtual antecipadamente de forma que não houvesse imprevistos com erros de montagem, evitando assim um corte errado ou um furo mal feito, situações que levariam a perda de tempo com retrabalho e de dinheiro para aquisição de novas peças.

Assim as peças, uma a uma, foram modeladas em ambiente virtual por meio de um software, e com as peças virtuais deu-se início as montagens dos mecanismos. Primeiramente foi montada uma região plana usando perfis metálicos modelo V-slot, esse tipo de perfil permite

anexar outros componentes em suas fendas que também servem como guia, limitando uma única direção. A região proveniente da montagem demarca a área útil da impressora, o que resultará na mesa de impressão, Figuras 3-A, 3-B.

Figura 3. (A) Perfil modelo V-Slot. (B) Montagem virtual com as peças modeladas.

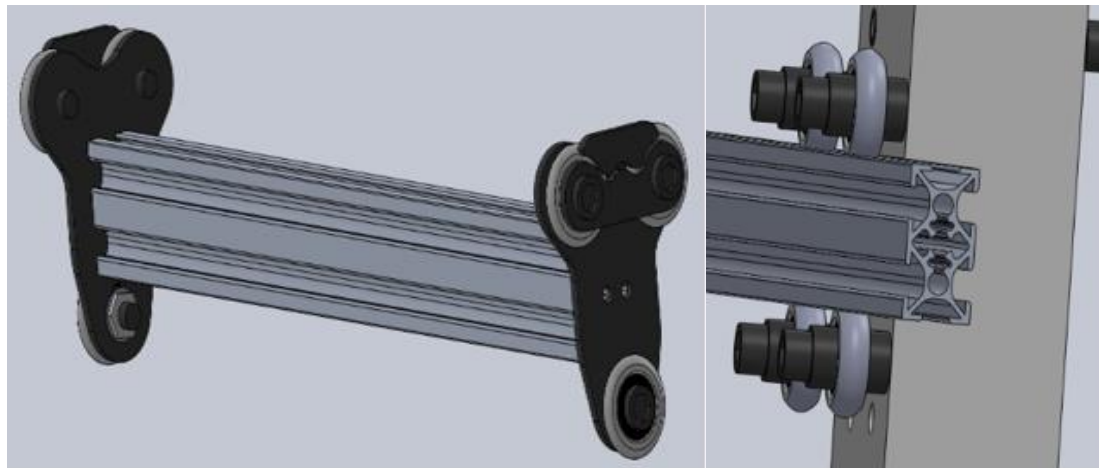


Fonte: Autoria própria (2019).

A próxima etapa foi confeccionar um mecanismo capaz de transladar internamente a estrutura metálica. Para isso foram utilizadas as fendas do perfil V-Slot como guias lineares para roletes que foram fixos na extremidade de outro perfil também modelo V-Slot, moldado com as dimensões internas da área de impressão. O translado desse perfil é responsável pela movimentação do eixo Y.

Para a movimentação do eixo X foi replicado o mesmo para o eixo Y, no perfil móvel utilizou-se das fendas presentes no perfil V-Slot como guias lineares para roletes, como na Figura 4 (B) (O que explica a utilização do mesmo para transladar em Y). Os roletes desta vez fixam uma peça intitulada de carro móvel e assim já é possível estabelecer uma movimentação bidirecional em X e Y, Figura 4 (B).

Figura 4. (A) Modelagem do perfil móvel. (B) Vista ampliada da fixação dos roletes no perfil.



(A)

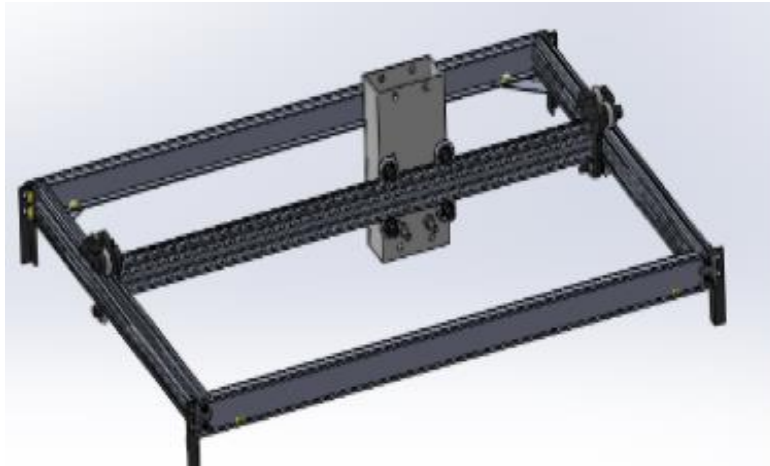
(B)

Fonte: Autoria própria (2019).

Após diversas simulações e mudanças estruturais, a movimentação em X e Y ficou bem definida para o fim desejado, suportando uma haste transportando argamassa. Das características mais marcantes que foram alteradas tem-se a orientação do perfil móvel que foi posicionado da horizontal para vertical a fim de evitar a flexão quando a massa estivesse concentrada em um ponto central. Outra mudança considerável foi o carro móvel, que foi alterado para um perfil retangular responsável por conter o mecanismo do eixo Z.

Apesar da movimentação prismática apresentar motores individuais para cada eixo, nessa impressora os mecanismos estão atrelados, Y o perfil móvel que se movimenta na estrutura externa para frente e para trás, suporta X, o carro móvel que se desloca no perfil móvel para esquerda e para direita e fixo no carro móvel estará o mecanismo responsável pela movimentação em Z, uma haste que se deslocará verticalmente para cima e para baixo, Figura 5.

Figura 5. Modelagem do sistema de movimentação X, Y e Z.

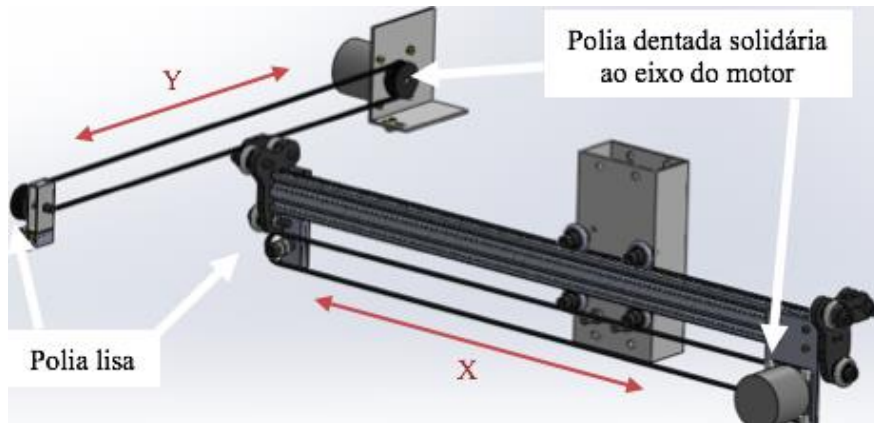


Fonte: Autoria própria (2019).

A próxima etapa de construção do projeto foi modelar as peças para transmissão de movimento junto com a fonte de movimento. A movimentação de todos os eixos é responsável pelos motores de passo 23LM-K005-20, fornecendo o torque e principalmente a precisão que requer um projeto de impressão 3D. A transmissão ficará a cargo de correias polias para X e Y, enquanto para Z a movimentação ficará a cargo de um pinhão e uma cremalheira.

Por serem peças de uma geometria complexa e específicas para uma medida encontrada no software, seria necessário imprimi-las em laboratório por meio de uma impressora 3D convencional. Assim foi realizado o processo de dimensionamento das polias fixas ao motor, e as polias de rolamento, no qual buscou-se encontrar um diâmetro intermediário entre o mínimo que a precisão da impressora disponível em laboratório seria capaz de produzir, garantindo um menor torque para o motor deslocar, e o máximo possível sem provocar conflitos entre os outros componentes fixos, Figura 6. Ambas as polias foram projetadas para correias do tipo GT2.

Figura 6. Implementação dos motores, polias e correias no sistema de deslocamento X e Y.



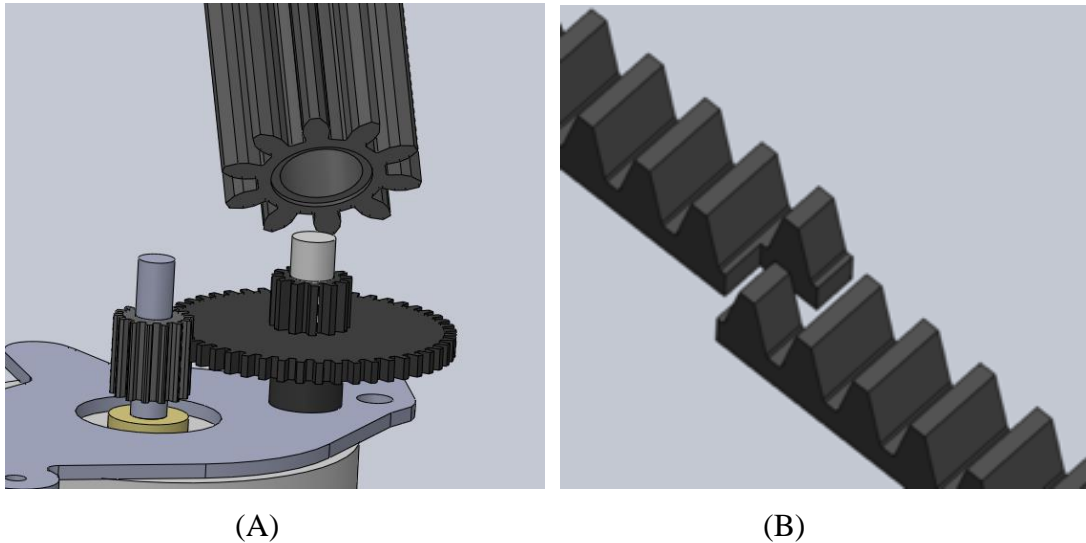
Fonte: Autoria própria (2019).

Iniciando então o mecanismo de movimentação vertical em Z, todo o mecanismo precisaria ser compactado no interior do carro móvel e por usar como transmissão de movimento um sistema de pinhão e cremalheira, esse seria mais complexo que os demais. Usando também um motor de passo para fornecer a energia mecânica, havia a necessidade de escolher um modelo menos robusto devido a inércia provocada pela movimentação constante do carro móvel. Outro fator problemático seria a tendência de torcionar o perfil móvel com o peso elevado do motor, fazendo necessário um estudo de posicionamento de cada componente inserido nesse sistema.

Foi adotado um motor de impressora matricial, mais compacto que os demais, no intuito de reduzir a ação da inércia e torção que seria provocada. O torque do novo motor em comparação com demais era menor, havendo a necessidade de desenvolver um conjunto de engrenagens que ampliassem o seu torque, essas engrenagens seriam impressas. Figura 7 (A).

O projeto do pinhão/cremalheira seguiu a mesma metodologia utilizada no desenvolvimento das polias. A engrenagem a ser impressa deveria ser reduzida o bastante para fornecer torque e com os dentes longos o suficiente para garantir resistência à peça. A cremalheira foi projetada de forma que permitisse sua extensão por encaixe já que não havia como imprimir a peça inteira com aproximadamente 1 metro, Figura 7 (B).

Figura 7. (A) Motor de passo e conjunto de engrenagens aplicadas para movimentação do eixo Z. (B) Cremalheira com sistema de encaixe.

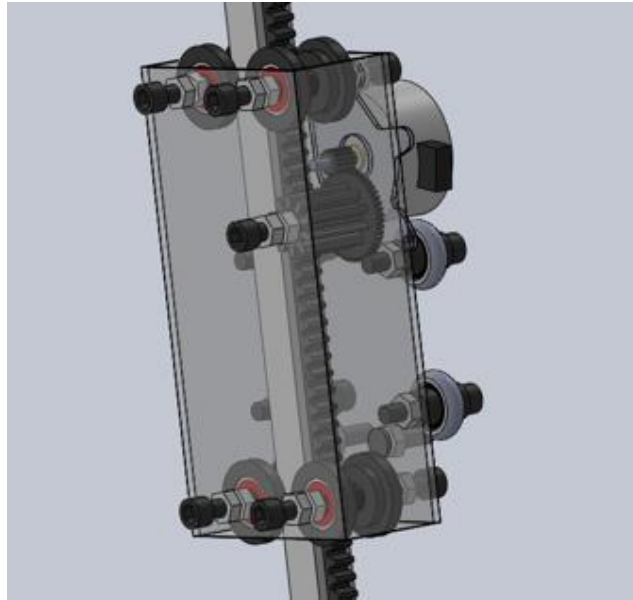


Fonte: Autoria própria (2019).

Como dito anteriormente, a movimentação no eixo Z ficou a cargo de uma haste, o que é incomum de se encontrar nas impressoras 3D convencionais onde a mesa de impressão que se desloca. Esse sistema de movimentação com uma haste foi desenvolvido para as necessidades do projeto onde se tem uma grande quantidade de componentes robustos, sendo necessário deixar estático o máximo possível deles. Usando uma haste é possível deslocar sem mais cargas extras o fluxo de argamassa, que já possui um peso próprio elevado.

A limitação em usar a haste é a inércia provocada devido ao seu comprimento, assim foi desenvolvido um sistema de polias que fixariam a haste pelas extremidades do carro móvel, reduzindo os momentos da inércia, Figura 8.

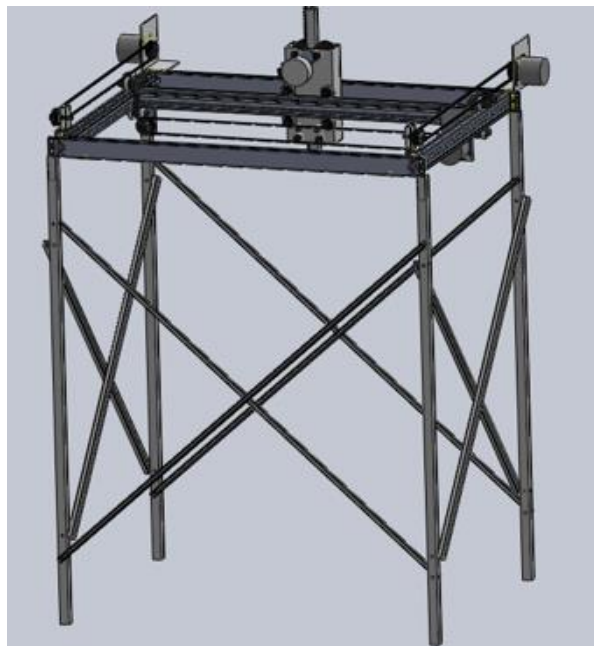
Figura 8. Mecanismo de funcionamento do eixo Z com todos os componentes.



Fonte: Autoria própria (2019).

Com os sistemas mecânicos definidos, a finalização do modelo virtual se deu com a inclusão dos suportes dando altura ao conjunto, estes suportes ficariam fixos nos quatro cantos da estrutura metálica externa, conectados por contraventamentos que evitariam oscilação por flexão, enquanto a impressora trabalhasse, Figura 9.

Figura 9. Estrutura mecânica fixa aos suportes.



Fonte: Autoria própria (2019).

A finalização da construção virtual ocorreu com uma verificação de resistência de toda a estrutura metálica no próprio software de modelagem, utilizando o método dos elementos finitos, simulou o apoio da estrutura pela face dos suportes, assim o conjunto foi submetido a uma carga arbitrária de 15N no carro móvel, fazendo uma relação aos esforços do fluxo de argamassa, Figura 10.

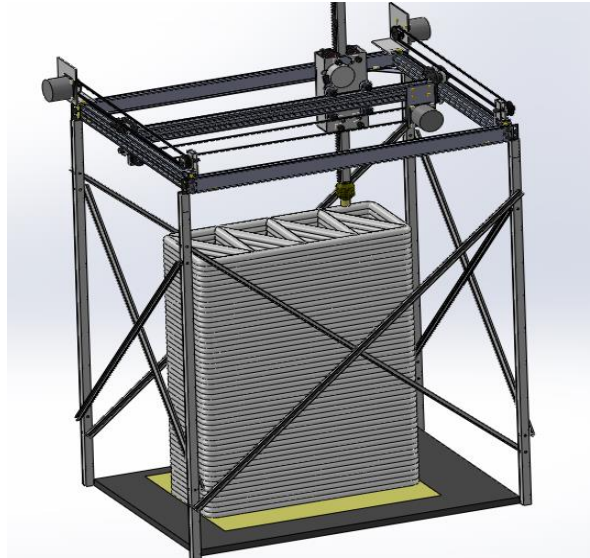
Figura 10. Verificação de resistência de toda a estrutura.



Fonte: Autoria própria (2019).

Foi verificado que a estrutura suportou a carga introduzida então com o resultado favorável deu-se início a próxima etapa. De forma representativa foi adicionada ao modelo virtual uma mesa de impressão que demarcava a área útil da impressora junto com o que se esperava do segmento de parede, Figura 11.

Figura 11. Modelagem completa da impressora 3D de edificações.



Fonte: Autoria própria (2019).

3.2 MONTAGEM DA ESTRUTURA FÍSICA COM BASE NO MODELO 3D

Com os materiais disponíveis e um guia virtual para montagem, inicialmente foi montada a estrutura metálica externa usando os perfis modelo V-Slot. A partir do modelo virtual todas as medidas de cortes e furos foram coletadas para a montagem, permitindo fazer um aproveitamento de todo o comprimento dos perfis, Figura 12. Nessa estrutura fazendo uso das fendas, o perfil móvel irá se deslocar em função do eixo Y.

Figura 12. Montagem da estrutura externa metálica.

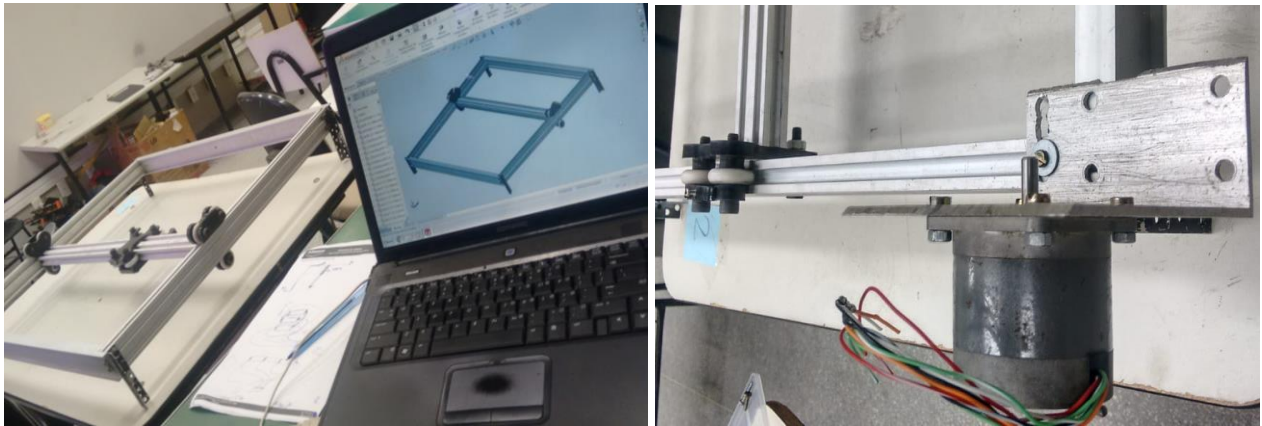


Fonte: Autoria própria (2019).

O perfil móvel foi montado a partir de um perfil modelo V-Slot onde foram fixados roletes nas duas extremidades, Figura 13 (A). Nessa imagem ainda é possível ver o antigo carro

móvel. Em seguida foram fixados a estrutura por meio de sucatas reaproveitadas, os motores de passo 23LM-K005-20, Figura 13 (B).

Figura 13. (A) Montagem do perfil móvel. (B). Motor de passo 23LM-K005-20.



(A)

(B)

Fonte: Autoria própria (2019).

Devido ao seu comprimento para garantir a movimentação correta do perfil móvel foram empregados dois motores trabalhando em paralelo. A conclusão do mecanismo, após inserção dos motores, se deu com a impressão das polias já modeladas e em seguida a fixação das correias, Figura 14-A. No total são utilizadas duas polias, uma com dentes, fixa ao motor, e outra lisa para dar tração a correia, fixa na estrutura externa por pedaços de sucatas, Figura 14-B.

Figura 14. (A) Impressão da polia dentada. (B) Sistema de transmissão completo com as polias e correia.



(A)

(B)

Fonte: Autoria própria (2019).

Com a movimentação em Y bem definida o próximo passo foi inserir os movimentos de translação em X, para isso no mesmo perfil que se desloca em Y foi anexado uma peça intitulada de carro móvel, foi aplicado o mesmo fundamento de roletes deslizando pelas fendas, o que explica a utilização interna do perfil modelo V-slot que é mais caro que os demais.

Os roletes foram fixos centralizados em um perfil retangular seguindo as medidas do modelo virtual, esses roletes foram espaçados o máximo possível de forma a evitar possíveis tombamentos provocados pela inércia. Com isso o perfil retangular intitulado de carro móvel pode se deslocar para direita e esquerda referente ao eixo X.

A transmissão de movimento assim como em Y fica a cargo de uma correia GT2, polias impressas e um motor de passo 23LM-K005-20 seguindo a mesma linha de raciocínio abordada no eixo Y, todos fixos no perfil móvel se baseando pela montagem virtual onde tudo já havia sido verificado em relação a conflitos de posicionamentos, Figura 15.

Figura 15. Mecanismos de translação do eixo X.



Fonte: Aatoria própria (2019).

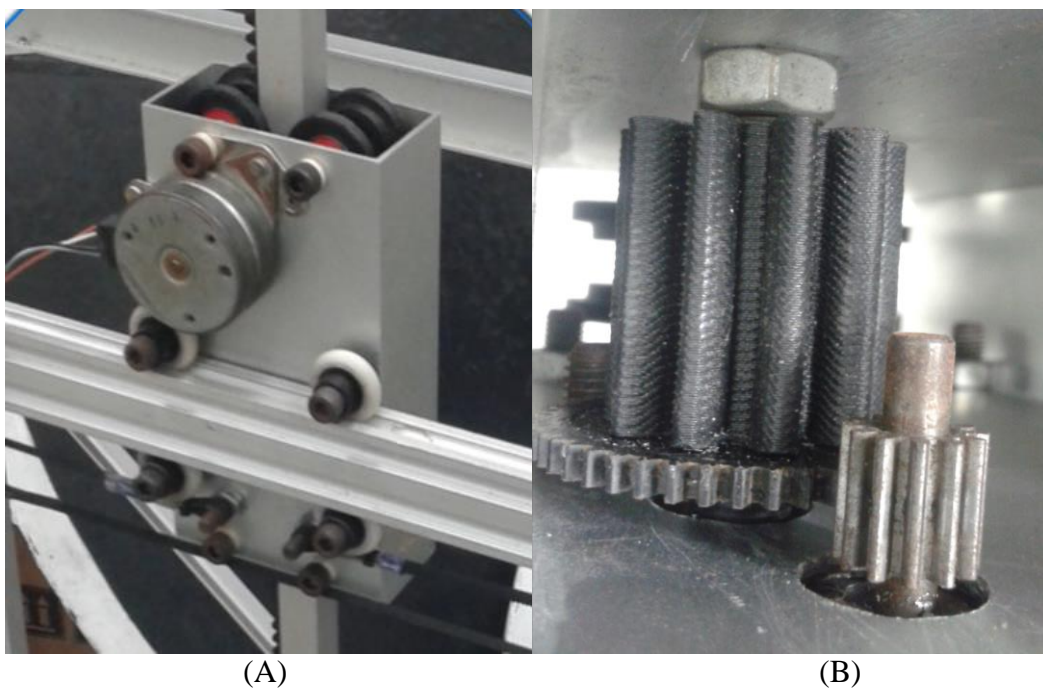
Na figura acima é possível verificar que cada posicionamento foi planejado com uma tolerância milimétrica. Os roletes precisam se movimentar livremente podendo ser interferidos pela trava das correias caso fossem posicionados mais acima, caso fossem deslocados também mais para baixo essa trava iria interferir no mecanismo do eixo Z que apesar de ainda não ter sido construído o projeto virtual já havia previsto todas essas situações.

Finalizando o sistema de translação em X deu-se início a alocação dos elementos do eixo Z, sendo o mecanismo mais complexo grande parte das peças foram impressas pela necessidade de um formato e tamanho específico para as polias, engrenagens e cremalheira. Como as peças já haviam sido modeladas e impressas restava posicioná-las, Figura 16-A.

Foi usado um motor de passo menos robusto (sem referências) retirado de uma impressora matricial posicionado acima do perfil de forma que servisse de contra peso para a haste, fixo de forma que o pinhão impresso engrenasse com a cremalheira, Figura 16-B.

Pela quantidade de esforço exercido pelo pinhão ele foi bi apoiado pelo conjunto do próprio motor e um parafuso usinado para o encaixe. As polias foram projetadas bi-partidas totalizando 8 partes, com um espaçador central dando espaço a largura da cremalheira, o posicionamento das polias foi realizado nas extremidades do carro móvel de forma que sustentasse a haste quando o conjunto estivesse em movimentação já que os elementos do eixo Z são os que mais se movimentam, pois é sustentado pelo eixo X que também é sustentado pelo eixo Y, dessa forma X ou Y se movimentando, Z também estará , logo a haste tubular possui 3 graus de liberdade.

Figura 16. (A) Alocação dos componentes de deslocação em Z no perfil do carro móvel. (B) Engrenamento dos componentes internos.



(A)

(B)

Fonte: Aatoria própria (2019).

A finalização do eixo Z se deu pela impressão de várias unidades da cremalheira que foram encaixadas por todo o comprimento da haste.

Com a movimentação tridimensional totalmente definida, a conclusão da estrutura mecânica ocorreu com a inclusão dos suportes (pés) dando altura à estrutura e de forma que toda a estrutura ficasse fixa, os contraventamentos foram adicionados nos pés e nas estruturas externas dos perfis V-Slot. Totalizando em milímetros as seguintes medidas externas 822x597x1038 referentes a largura, profundidade e altura respectivamente, enquanto para os eixos X, Y e Z em termos de deslocamento útil foram obtidos 526 mm, 431 mm, e 790 mm, Figura 17.

Figura 17. Estrutura mecânica completa.



Fonte: Autoria própria (2019).

3.3 SIMULAÇÃO DOS ELEMENTOS ELETRÔNICOS/ COMPUTACIONAIS.

Com a conclusão dos elementos mecânicos e estruturais realizada, devido a suspensão das atividades acadêmicas por conta da pandemia de covid-19, para dar continuidade ao projeto foram realizadas simulações com o material digital feito no início para dar suporte na construção. Com a modelagem realizada inicialmente e a construção do protótipo virtual foi possível dar seguimento às atividades fora do laboratório.

O tempo afastado do laboratório foi também aplicado à produção de artigos, nos tópicos 3.3.1 e 3.3.2 serão abordados de forma sucinta duas pesquisas derivadas do projeto *Home Printer*, um deles foi selecionado para publicação em uma revista acadêmica. O direcionamento do artigo foi avaliar a resistência mecânica do segmento de parede impresso, em comparação com uma parede de alvenaria. A partir dos resultados as características geométricas do segmento de parede seriam avaliadas sujeitas a alteração, de forma que apresentasse o melhor resultado possível.

A outra pesquisa derivada diz respeito a simulação da trajetória de impressão usando uma eletrônica digital, com este estudo foi possível realizar uma simulação computacional e eletrônica da impressão base de um segmento de parede, encerrando o ciclo mecânico e introduzindo a pesquisa conceitos de computação e eletrônica, abrindo uma nova linha de pesquisa, amadurecendo os conceitos para implementação da aparelhagem eletrônica e dos fundamentos teóricos necessários para programação dos controladores, desenvolvendo uma rotina CNC aplicando as condições físicas da máquina.

3.3.1 SIMULAÇÃO DE DEFORMAÇÃO E RESISTÊNCIA DO SEGMENTO DE PAREDE VIRTUAL

Com a modelação do que se esperava do seguimento de parede foram realizadas simulações de resistência usando o método dos elementos finitos no intuito de coletar dados referentes ao que seria apresentado na prática, possibilitando realizar modificações havendo necessidade.

Para realização dos estudos foram aplicadas as propriedades físicas da argamassa com traço 1:1:6 (cimento, cal, areia), devido a sua grande utilização na alvenaria e uma maior disponibilidade de dados na literatura para levantamento das suas propriedades. Com base no material bibliográfico descrito, foi possível elaborar a tabela 1 com as principais características físicas da argamassa de traço 1:1:6, possibilitando virtualmente executar os testes de resistência por meio do método dos elementos finitos.

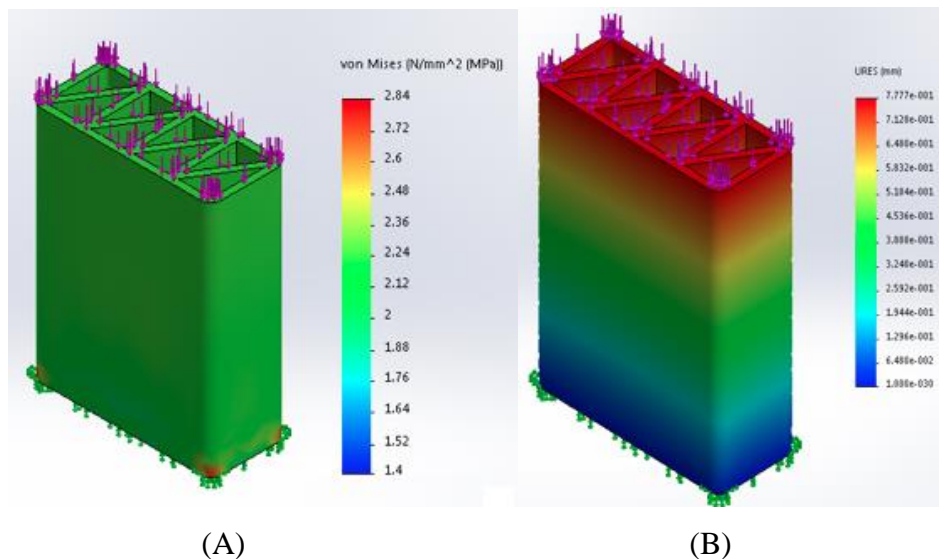
Tabela 1 – Propriedades Físicas da argamassa com traço 1:1:6

Propriedades	Valor	Unidades
Módulo elástico	1972	$\frac{N}{mm^2}$
Coefficiente de Poisson	0.2	$\frac{N}{A}$
Massa Específica	1775	$\frac{N}{m^3}$
Resistência a Tração	0.78	$\frac{N}{mm^2}$
Resistência a Compressão	2.87	$\frac{N}{mm^2}$
Limite de escoamento	53.54	$\frac{N}{m^2}$
Condutividade térmica	0.15	$\frac{N}{(mk)}$

Fonte: Adaptado de BASTOS, (2010); MACIEL, (2016); MOHAMAD, (2009); MOHAMAD, (2006); SILVA, (2008).

Através de uma simulação de compressão, a carga foi concentrada por toda a superfície do seguimento de parede de forma uniforme e com o apoio distribuído por toda área da base, o software apresentou o resultado até ruptura, o segmento de parede suportaria até 120 kN, Figura 18-A. Para a simulação de deslocamento o software apresentou com as mesmas condições citadas uma diminuição de 0.78 mm na altura do segmento de parede, Figura 18-B.

Figura 18. (A) Resultado do ensaio de compressão. (B). Resultado do ensaio de deslocamento.



Fonte: Autoria própria.

Comparando os dados colhidos pela simulação virtual e comparando com ensaios mecânicos já realizados com segmentos de paredes tradicionais em alvenaria. Os resultados da parede impressa mostraram-se promissores levando em consideração que são dados aproximados e certamente haverá mudanças positivas nas propriedades físicas com a adição do polímero, para composição da argamassa polimérica.

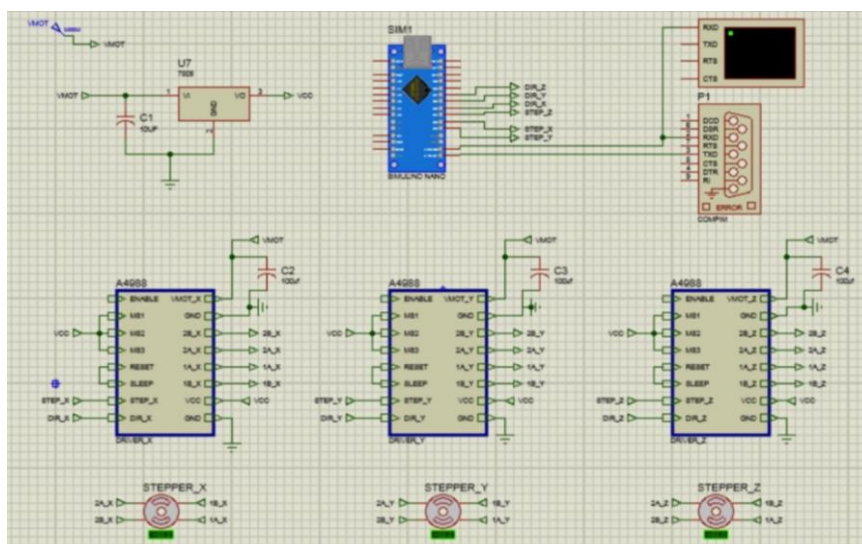
Outro fator a ser levado em consideração nos resultados obtidos por meio das simulações, diz respeito a geometria e espessura das camadas que compõem o segmento de parede virtual. De forma que este venha a alcançar resultados melhores uma solução rápida seria a implantação de mais um filete, a partir de alterações nessas características geométricas o valor da resistência à compressão irá variar, sendo necessário um aumento de três vezes a espessura utilizada, ou seja 3 passagens para que se aproxime dos valores das paredes de alvenaria. Dessa forma é possível inúmeras combinações a serem testadas a fim de alcançar um resultado adequado.

3.3.2 SIMULAÇÃO DE IMPRESSÃO USANDO ELETRÔNICA DIGITAL

Com este estudo foi possível realizar a simulação computacional e eletrônica da impressão base de um segmento de parede, encerrando o ciclo mecânico e introduzindo a pesquisa conceitos de computação e eletrônica, abrindo uma nova linha de pesquisa, amadurecendo os conceitos para implementação da aparelhagem eletrônica e dos fundamentos teóricos necessários para programação dos controladores, desenvolvendo uma rotina CNC aplicando as condições físicas da máquina onde se espera simular a impressão virtual do seguimento de parede, analisando o modelo virtual da impressora para que seja capaz de realizar os movimentos de impressão.

O código G com as instruções cartesianas para a trajetória da impressão foi obtido por meio do software CNC Simulator Pro, a próxima etapa foi sua implantação no Arduino Virtual a fim de simular a movimentação dos motores para cada eixo, deixando o código fonte pronto para testes em trabalhos futuros. Foi encontrado no software PROTEUS, as funções necessárias para dar continuidade a simulação e com a montagem do circuito referente a conexão do Arduino aos *drivers* completa, foram adicionados três motores de passo, responsáveis pelo movimento em cada eixo coordenado X, Y e Z. Componentes extras foram adicionados: Um display e uma porta serial virtual para realizar envio e exibição de dados para comandar o circuito completo, Figura 19.

Figura 19. Circuito montado com Arduino, drivers e motores.

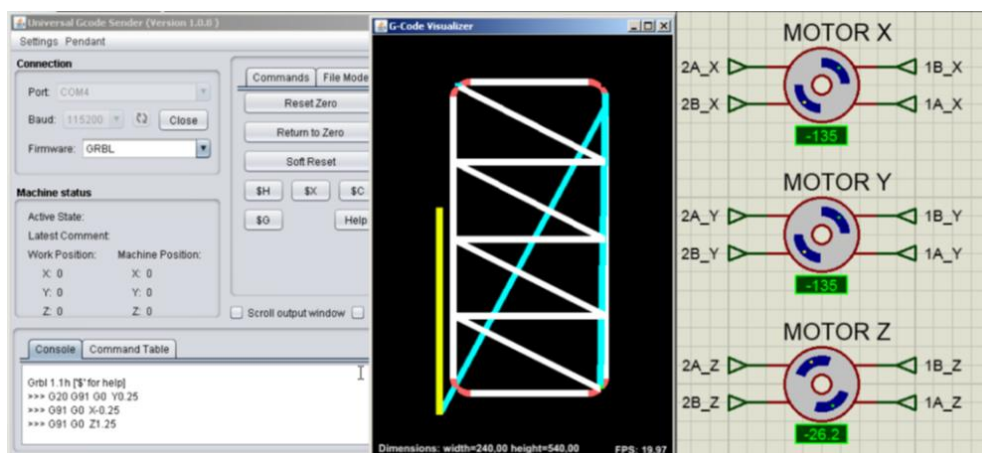


Fonte: Carvalho (2021).

Foi utilizado o software Universal G Code Sender, que interpreta o código G em coordenadas e o transforma em comandos para os motores, essa interpretação é feita por meio do firmware GRBL implantado no Arduino virtual. Outro software adotado nessa pesquisa foi o VSPE, Virtual Serial Ports Emulator, fazendo conexão entre os softwares Universal G Code Sender e Proteus.

Simulando a trajetória de impressão de uma geometria pré-definida da camada de um segmento de parede foi também possível visualizar os movimentos dos motores de cada eixo executando o código G, Figura 20.

Figura 20. Resultado final da simulação da movimentação de cada eixo, extraído através do código G.



Fonte: Carvalho (2021).

Através desse estudo foi possível deixar um histórico para aplicações futuras, mostrando o caminho a percorrer fora do ambiente virtual. Direcionando o trabalho em sua totalidade para uma nova linha de pesquisa, introduzindo conceitos necessários para o andamento das atividades.

3.4 IMPLANTAÇÃO DO MATERIAL ELETRÔNICO E PRIMEIROS TESTES DE DESLOCAMENTO.

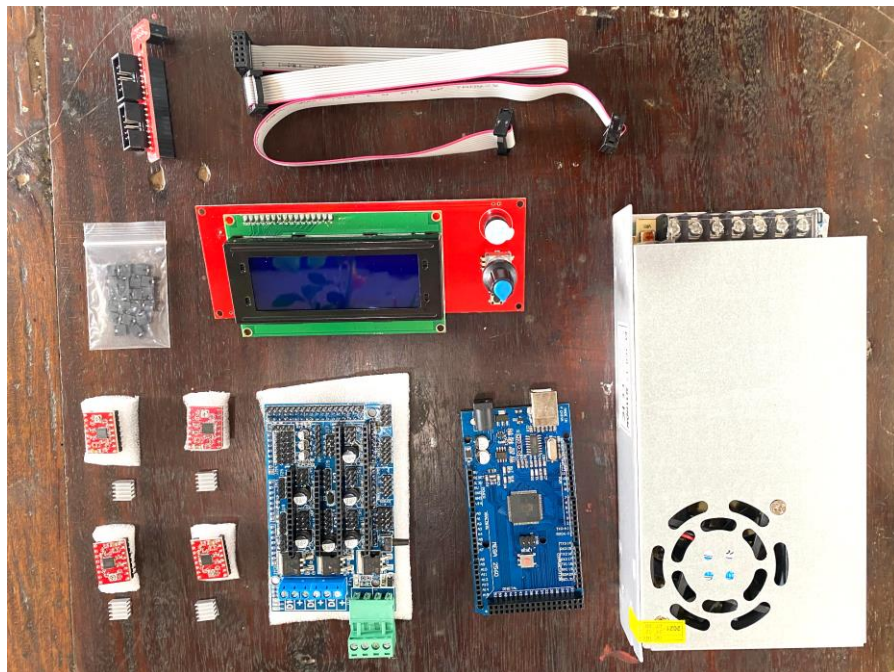
A definição da parte eletrônica foi realizada a partir de uma análise sobre os materiais disponíveis no mercado, assim foi definido usar o Arduino, já que as outras placas controladoras para conseguir sincronizar a um computador seria necessário o uso de componentes periféricos adicionais dando suporte ao cabo serial DB25 (ZAVELINSKI, 2017). Enquanto no Arduino de forma simples essa sincronização é realizada por meio de um *plug-in*

USB. Outros parâmetros foram levados em consideração nessa escolha como por exemplo, o custo benefício da utilização de uma plataforma de prototipagem livre, ou seja, não ficaria limitada apenas ao controle de uma máquina CNC. Além da quantidade de material de apoio disponibilizado pelos vários usuários dessa plataforma.

Após a definição do material eletrônico a ser usado, foi necessário um período de introdução aos processos de programação do Arduino para obter conhecimento dos conceitos básicos do software e manipulação do hardware.

Com certo domínio na utilização da plataforma foram detectados a necessidade de adicionar ao Arduino componentes para realizar a interface entre placa controladora e motores de passo inclusos na construção mecânica. Em 2022 foi encomendado toda a eletrônica necessária para dar continuidade às atividades no laboratório, Figura 21.

Figura 21. Material eletrônico para impressora de edificações.



Fonte: Aatoria Própria (2022).

O controle dos motores ficará sob a responsabilidade de uma placa de prototipagem livre, o Arduino. Para esse projeto foi adotado uma placa de Arduino Mega 2560 que possui mais memória que os demais modelos, a necessidade dessa memória extra é devido a utilização de

um *firmware* que fornece uma linguagem de baixo nível para o hardware, a placa de Arduino, Figura 22.

Figura 22. Placa de Arduino Mega 2560.



Fonte: Autoria própria (2022).

Os comandos que a placa de Arduino envia na forma de pulsos são recebidos pelos *drivers* A4988, eles irão direcionar a corrente da fonte de alimentação para os motores trabalharem corretamente. Esse intermédio é realizado pela presença em *driver* de um circuito ponte H, onde é realizada a comutação entre chaves (estado sólido) para inversão da polaridade e chaveamento das bobinas do motor (NERY, 2020). Cada eixo cartesiano possui um driver para seu controle, Figura 23.

Figura 23. Drivers A4988.



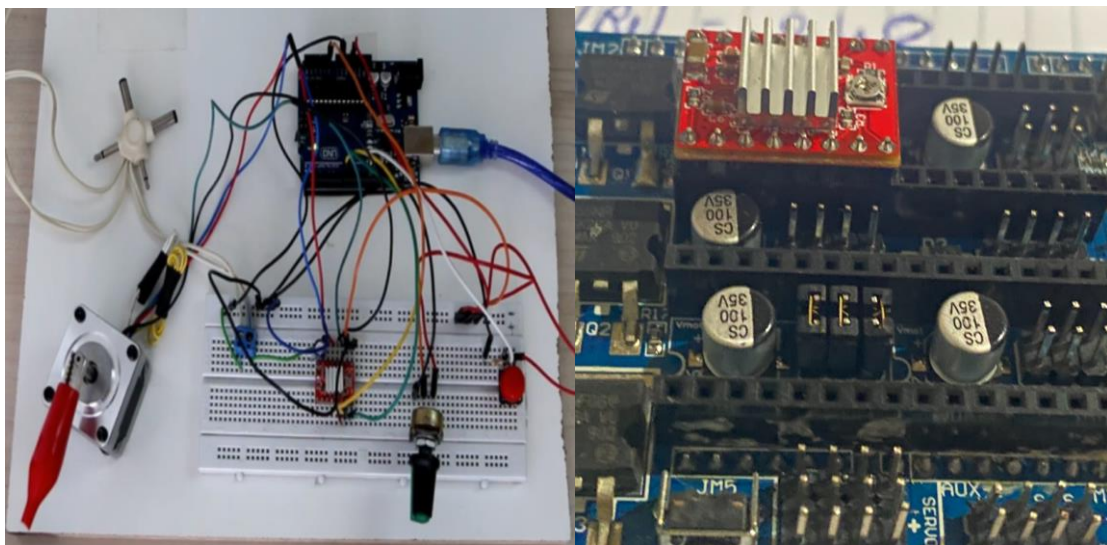
Fonte: Autoria própria (2022).

Diferente da simulação realizada com a placa de Arduino virtual e os drivers, onde a conexão era realizada de forma simplificada por meio de variáveis, na prática para conectar cada *driver* ao Arduino requer um circuito externo onde são realizadas as corretas ligações dos

pinos. A fim de facilitar a conexão entre os *drivers* e o Arduino, existe uma placa fabricada, a *shield* RAMPS, que é responsável por incorporar o circuito externo que seria necessário para cada *driver*, Figura 24-A.

Ela simplifica em uma placa, que é diretamente ligada no Arduino e faz a conexão com os *drivers* utilizados. Para esse trabalho foi adquirida uma placa RAMPS 1.5, onde todo o *layout* foi desenvolvido para realizar de forma simplificada a conexão entre o Arduino Mega e os *drivers* A4988, Figura 24-B.

Figura 24. (A) Circuito externo montado para comunicação entre a placa de Arduino e o driver A4988. (B) RAMPS e fazendo as conexões entre os drivers diretamente do Arduino.



(A)

(B)

Fonte: Arduino Maker (2021).

Fonte: Autoria própria (2022).

Os motores de passo necessitam de uma fonte externa de energia devido ao alto consumo, sua utilização requer uma demanda de corrente não suportada pela placa de Arduino. Foi encomendada uma fonte chaveada 12 Volts com 30 Amperes, Figura 25. Responsável não apenas pela alimentação dos motores, essa fonte será empregada em futuras otimizações do projeto com o incremento de resistências térmicas para secagem rápida na extrusão da argamassa.

Figura 25. Fonte chaveada 12 Volts 30 Amperes.



Fonte: A autoria própria (2022).

Com o intuito de tornar a máquina independente de um computador, foi também adquirido um *display* LCD controlador gráfico RepRap, com 20x4 pixels, Figura 26. O *display* possibilita a impressão *offline* por meio de um *slot* para cartão SD onde o código G é gravado.

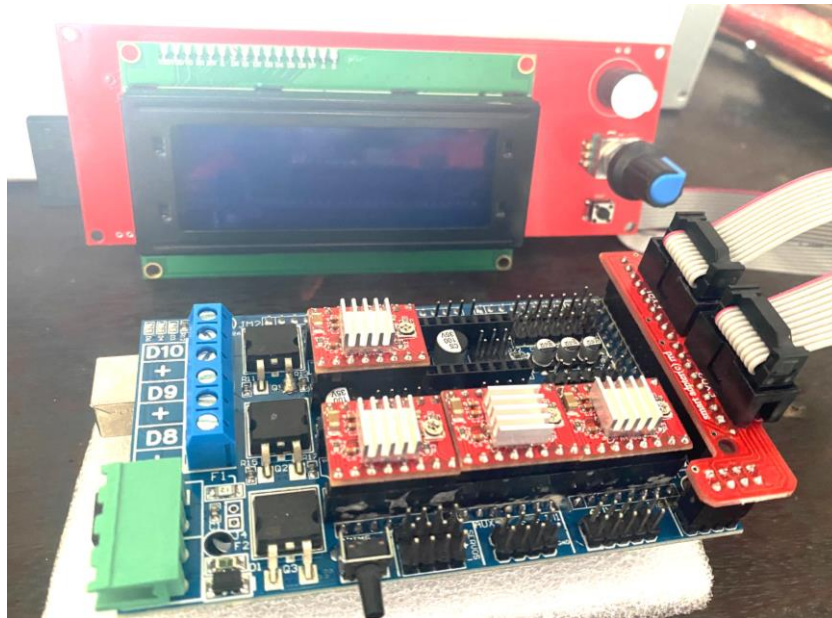
Figura 26. *Display* LCD controlador gráfico RepRap.



Fonte: A autoria própria (2022).

Conectando todos os elementos, a próxima etapa foi configurar o *firmware* que seria compilado na placa do Arduino, Figura 27.

Figura 27. Montagem do conjunto eletrônico.

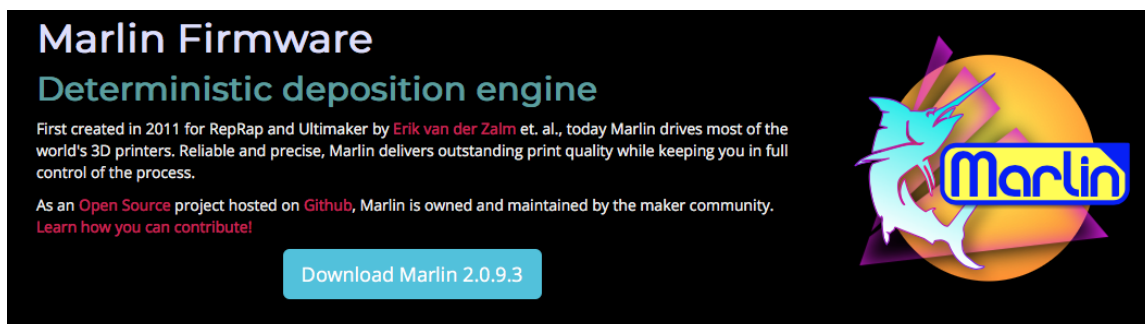


Fonte: Aatoria própria (2022).

Marlin foi o *firmware* adotado para controle da impressora, ele possui um código aberto projetado principalmente para as impressoras FDM (Fused Deposition Modeling), modelagem por fusão e deposição, diferente do que foi feito nas simulações, onde o código G extraído foi referente ao processo inverso onde ocorre a remoção de camadas por meio de uma ferramenta, inviabilizando o código G para utilização futura.

O motivo da escolha de uma placa de Arduino Mega, de maior custo que as demais, foi justamente por ser o modelo com memória suficiente para comportar o *firmware* Marlin, cujo *download* está disponível de forma gratuita no site oficial da companhia, Figura 28.

Figura 28. Site oficial da companhia Marlin.

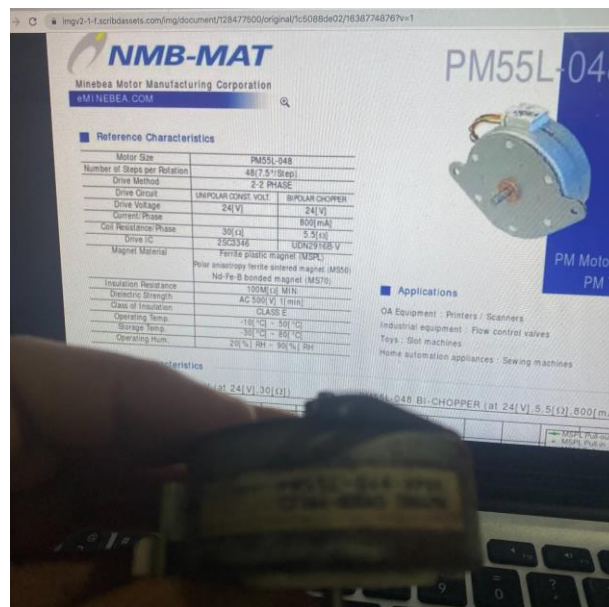


Fonte: Aatoria própria (2022).

Antes de ser implantado no Arduino, o *firmware* e o *hardware* necessitam ser configurado alterando as variáveis únicas de cada impressora como a corrente a ser enviada para os motores, a quantidade de passos por milímetro, micropassos de cada eixo, temperatura de trabalho da máquina, sistema de movimentação, configurações do *display*.

A corrente direcionada para os motores é uma configuração realizada a partir de uma tensão de referência calculada a partir de dados dos motores de passo. Para testes, um motor arbitrário foi utilizado de forma que qualquer erro não comprometesse o projeto. Por meio de sua referência, modelo Pm55l-048-hp69 foi possível encontrar o *datasheet* contendo as informações técnicas necessárias para se calcular a tensão de referência, Figura 29.

Figura 29. Motor de passo Pm55l-048-hp69 e datasheet.



Fonte: Autoria própria (2022).

O cálculo é realizado através da equação:

$$V_{ref} = 8 * R * I$$

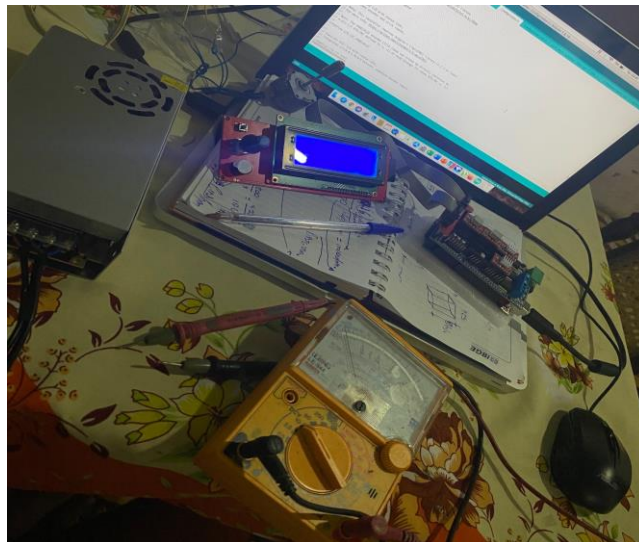
Onde:

R é o valor do resistor acoplado ao driver A4988 (0,1 ohm);

A é a corrente de trabalho do motor 0.8 Amperes.

Trabalhando com 80% da capacidade máxima do motor para evitar sobrecargas, a corrente de trabalho foi reduzida para 0,64 amperes, e assim a tensão de referência foi calculada em 0,512 volts. Para que o *driver* forneça os 0,64 amper ao motor é preciso ajustar em um *trimpot* anexo ao *driver* o valor calculado da tensão de referência, esse ajuste é realizado com intermédio de um multímetro indicando a tensão apresentada até que se chegue na desejada, 0,512 volts. Figura 30.

Figura 30. Cálculo e ajuste da tensão de referência por intermédio de um multímetro.



Fonte: Autoria própria (2022).

No código do Marlin foi necessário incluir os valores referentes aos passos por milímetro, esse valor diz respeito a quantidade de revoluções do motor “passos” necessárias para que o eixo se deslocasse 1 milímetro. A partir desse valor é calculado pela máquina durante a impressão a corrente elétrica direcionada para os motores rotacionarem de forma que direcionam os eixos para impressão da peça.

O cálculo dos passos por milímetro é pela equação:

$$\text{Step/mm} / \text{CMP} = (\text{Step} * \text{CMP}) / (\text{Step} * \text{CMP})$$

Onde:

Step/mm= Passos por milímetro;

CMP= Configuração usada no micro-passo;

PVM= Passos para uma volta do motor;

PC= Passo da correia;

DP= Dentes da polia.

A configuração usada no micro-passo (CMP) é um valor tabelado a partir de uma configuração realizada na RAMPS onde se determina a divisão em mais partes de um passo do motor, formando assim os micropassos. Essa configuração é realizada por *jumper*s e é individual para cada eixo, essa configuração pode ser vista na figura 31, abaixo de cada drivers está a pinagem com opção de ser ou não ligada. Essa configuração vai de acordo com a tabela de micropassos, Figura 31.

Figura 31. Tabela de micropassos.

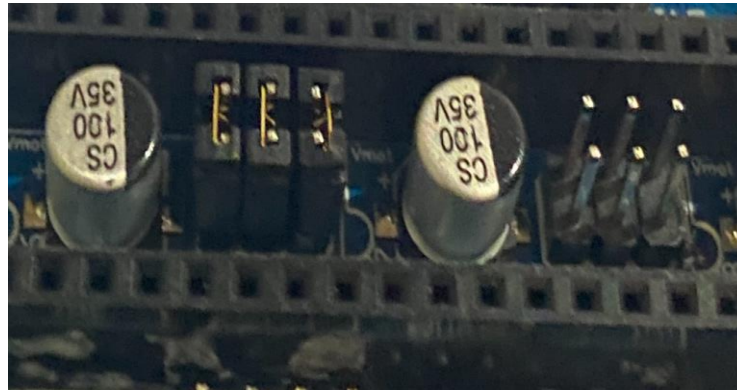
Resolução Micro-passo	MS3	MS2	MS1
Passo completo	0	0	0
meio passo	0	0	1
1/4 passo	0	1	0
1/8 passo	0	1	1
1/16 passo	1	1	1

Fonte: Eletrogate (2018).

Os passos para uma volta do motor (PVM) é um valor definido no *datasheet* do motor, corresponde a quantidade de posições que o rotor pode assumir por volta, no caso do motor Pm551-048-hp69, foi verificado em seu *datasheet* que em uma revolução de 360° ele pode assumir 200 posições distintas. Já os micropassos correspondem à divisão de uma posição aumentando ainda mais a precisão, no entanto ocorre uma perda de torque à medida que se aumentam os micropassos.

Conectando todos os pinos foi adotado para realização dos testes a associação 1/16 passo (1 1 1), onde uma das duzentas posições distintas seria dividida por 16 totalizando 3200 micropassos por volta, Figura 32.

Figura 32. Configuração manual de micropassos (1 1 1), onde todos os pinos foram conectados.



Fonte: Autoria própria (2022).

Passos para uma volta do motor (PVM), diz respeito aos 200 passos descritos no *datasheet*, Figura 29.

Continuando a definição dos passos por milímetro, PC o Passo da Correia GT2 adotada para transmissão é 2 mm, o mesmo passo da polia projetada para o sistema de transmissão. A quantidade de dentes da Polia DP foi 53.

Calculando o passo por milímetro a partir desses valores se obtém.

$$\frac{3200}{100} = (16 * 200) / (2 * 53)$$

$$\frac{3200}{100} \cong 30$$

Ou seja, para que o eixo se deslocasse 1mm, o motor percorre 30 micropassos dos 3200. Esse cálculo foi realizado para cada eixo, e o valor final é alterado no Marlin na aba de configurações de movimento. Linhas de código – 1, Anexo 1.

Se tratando de um teste com um motor arbitrário, a alteração se fez necessária apenas em um eixo. Para execução na impressora de edificações será necessário repetir o processo com os motores adotados em cada eixo. Para o eixo X e Y o sistema de transmissão é idêntico com os mesmos motores, polias e correias obtendo o mesmo valor de passos por milímetro. Para Z será necessário levar em consideração fatores como o sistema de engrenagens associado ao eixo.

Outra alteração direta no código fonte do Marlin na aba de configurações mecânicas foi na definição do tipo de movimento. A impressora de edificações trabalhará com uma movimentação cartesiana, dessa forma é necessário desabilitar as opções de movimentação combinada entre os eixos. Linhas de código – 2, Anexo 1.

Finalizando as configurações iniciais o display foi habilitado no código, e o firmware estava pronto para realização dos testes. A próxima etapa foi instalar os *drivers* do Arduino para que fosse reconhecido pelo computador e a compilar o Marlin.

Ajustando o contraste do display foi possível visualizar o layout com as funções da impressora. Foi utilizada a versão do Marlin 1.1.9.1 devido a configuração simplificada das funções explícitas no código, além da maior disponibilidade de conteúdo sobre sua programação, Figura 33.

Figura 33. Tela inicial do Marlin compilada na placa do Arduino.



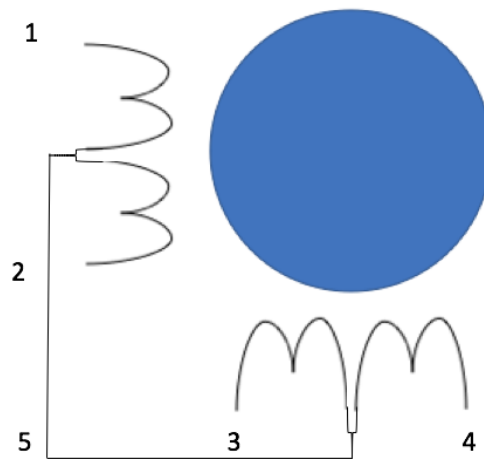
Fonte: Autoria própria (2022).

A conexão do motor a RAMPS para validar o correto funcionamento do conjunto necessitava de um ajuste nas bobinas do motor. Quatro pinos ao lado de cada *driver* A4988 fazem a conexão entre a RAMPS e os motores, esses quatro pinos dão suporte a motores bipolares.

Todos os motores da impressora, assim como o motor teste são motores unipolares, caracterizados pela presença de um cabo entre o enrolamento de suas bobinas, (*center-tape*).

Para a ligação dos motores unipolares aos quatro pinos da RAMPS é necessário identificar o *center-tape* e as extremidades das boninas. Para isso é necessário a utilização de um multímetro na escala ôhmica, cada um dos terminais do motor foi medido a fim de encontrar resistências equivalentes e assim identificar as bobinas, Tabela 2. O motor de testes possui 5 cabos, nessa configuração as bobinas estão conectadas pelo *center tape*, ou seja, dois cabos por bobina e um *center tape*, Figura 34.

Figura 34. Identificação das bobinas no motor teste.



Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 2. Resistências medidas entre as ligações onde se evidencia que o cabo 5 é o *center tape*.

Ligação	Resistência	Ligação	Resistência	Ligação	Resistência	Ligação	Resistência
1-2	28 Ω	1-3	28 Ω	1-4	28 Ω	1-5	15 Ω
2-1	28 Ω	2-3	28 Ω	2-4	28 Ω	2-5	15 Ω
3-1	28 Ω	3-2	28 Ω	3-4	28 Ω	3-5	15 Ω
4-1	28 Ω	4-2	28 Ω	4-3	28 Ω	4-5	15 Ω
5-1	15 Ω	5-2	15 Ω	5-3	15 Ω	5-4	15 Ω

Fonte: Autoria própria (2022).

Os motores da impressora possuem 6 cabos, nessa configuração cada bobina possui um *center tape* individual, ou seja, dois cabos por bobina e um para cada *center tape*. A localização de cada um é realizada de maneira análoga por meio de um multímetro.

Aterrado o *center tape* e fazendo a conexão do motor nos pinos do eixo X a verificação de movimento deu continuidade com os comandos do Marlin onde no menu central do firmware foi selecionada a opção preparar, em seguida, mover eixos, e mover eixo X.

A opção de mover eixos é dada em milímetros, onde o operador ajusta o valor, esse é então convertido em passos transmitidos pelo motor. A rotação correta é em função do valor calculado e introduzido no código dos passos por milímetro.

Uma pequena alteração no código foi necessária na aba da configuração dos *Endstop* ou fins de curso. O software entendia que o motor estava sempre em seu ponto de deslocamento mínimo não retornando para posições anteriores. Assim foi habilitando que o motor girasse de forma horária ou anti-horária, em milímetros indo para frente e para trás.

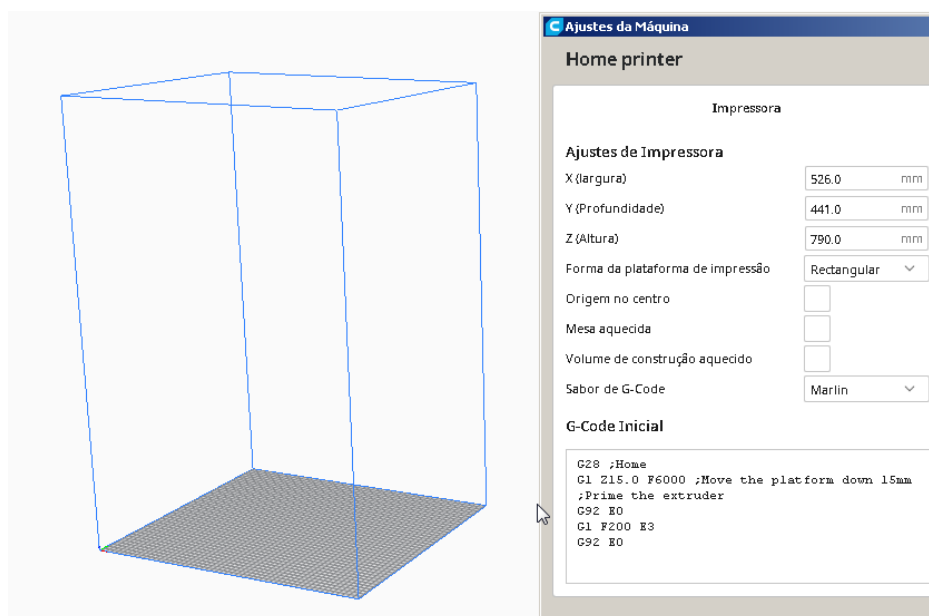
Na mesma aba, também foram habilitadas as definições de fins de curso no ponto mínimo de cada eixo. Linhas de código – 3, Anexo 1. Ou seja, quando fossem acionados estaria indicando que ali seria a posição *Home*, a origem dos eixos do sistema cartesiano (X=0, Y=0, Z=0).

A próxima etapa foi simular a impressão de um componente, para isso seria necessário submeter em um cartão SD as instruções para a trajetória dos eixos, o código G. Esse código é gerado por um *software* fatiador.

Para gerar o código G foi utilizado o software Ultimaker Cura, nele são definidas questões de preenchimento da peça, espessura, quantidade de filetes, número de camadas, entre outras características fundamentais para uma impressão tridimensional. Diferente do código G gerado na simulação do CNC Simulator Pro, o código gerado pelo Cura é propriamente para deposição de camadas.

Inicialmente foram definidas as dimensões teóricas da mesa de impressão com a área útil da impressora devido as características da máquina estarem pré configuradas seguindo dimensões padronizadas pela fabricação de componentes para impressão 3D convencionais, Figura 35.

Figura 35. Demarcação da área útil para impressão.

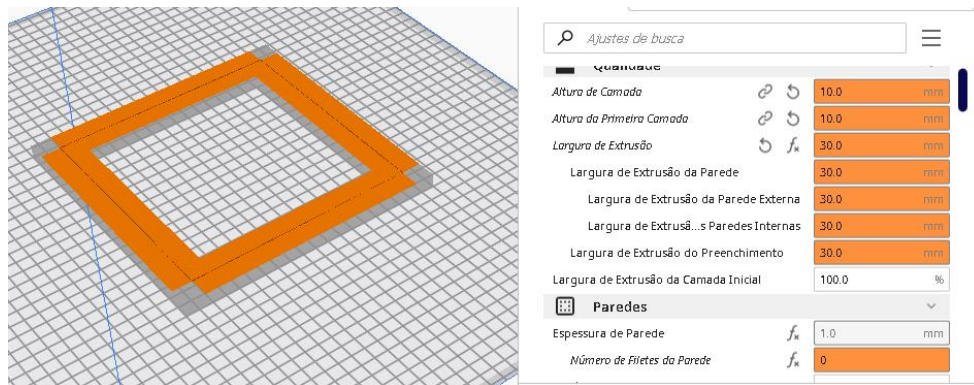


Fonte: Autoria própria (2022).

De forma que a impressora se comportasse como previsto, o software de fatiamento foi destrinchado para dar suporte a impressão do segmento de parede. A primeira alteração a ser realizada no software foi com relação ao diâmetro do bico injetor, em impressoras 3D comumente são encontrados bicos com 0,4 milímetros, a impressora de edificações usa um bico de 15mm para deposição da argamassa, assim foi alterado a largura do bico para 15mm. A altura de cada camada foi definida em 10mm, com um preenchimento concêntrico sem parede externa, a ideia seria fazer o contorno que daria origem à peça. O preenchimento mínimo de dois filetes não pode ser removido, dessa maneira a forma encontrada para a impressão planejada da peça foi alterar a largura do filete para 30 mm, resultando em dois segmentos com 15mm, Figura 36.

Para simular a impressão um cubo foi modelado e importado do software de modelagem geométrica com as medidas 200x200x10mm. A altura de 10mm foi planejada para impressão em camada única, assim facilmente poderiam ser verificadas questões de trajetória, tolerância dimensional, velocidade, e deposição da argamassa. Para leitura do fatiador o arquivo importado do modelador necessita estar no formato de STL.

Figura 36. Configuração dos parâmetros de impressão no software fatiador Ultimaker Cura.



Fonte: Autoria própria (2022).

Com o fatiamento concluído, dando segmento a simulação da impressão com o motor teste. O código G foi exportado do software fatiador para o cartão SD, em seguida este foi conectado ao leitor de cartões disponível na placa do *display*.

Para execução do código inserido, no menu principal foi selecionado a opção imprimir do SD, nessa partição estão listadas as peças importadas. Ao acionar o cubo para impressão o *firmware* Marlin por medida de segurança não permitiu que o processo desse início acusando erro E1: Temperatura mínima, Figura 37.

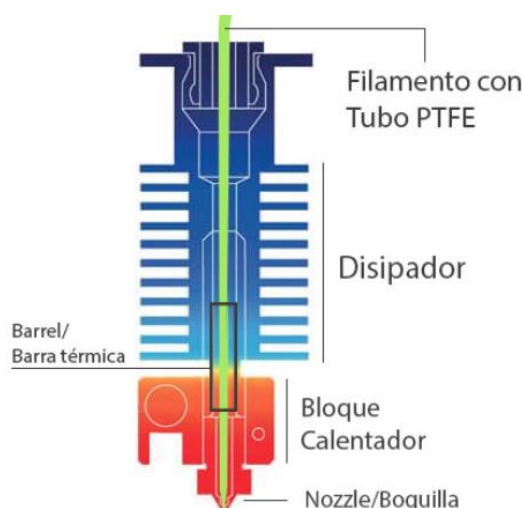
Figura 37. Erro E1: Temperatura Mínima.



Fonte: Autoria própria (2022).

Revisando o material bibliográfico foi observado que esse tipo de erro está associado ao HOTEND (Conjunto submetido a alta temperatura). Em impressoras 3D convencionais, esse tipo de erro evita que a máquina inicie o processo de impressão antes que o bico atinja uma temperatura programada para trabalho, Figura 38.

Figura 38. Elementos do HOTEND.



Fonte: FILAMENT2PRINT (2020).

O *firmware* Marlin, assim como o fatiador Cura estão pré configurados para impressão de materiais poliméricos termoplásticos como, PLA um ácido polilático extraído de fontes naturais como o amido de milho e raízes da mandioca , e o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) derivado do petróleo. Para impressão da peça o HOTEND aquece o termoplástico que é extrudado.

Bloqueios foram inseridos no *firmware* de impressão como o erro E1, que impede a extrusão do material antes que o HOTEND esteja preparado para o derretimento dos filamentos, comprometendo assim o aparelho.

Como a impressora de edificações irá realizar um processo de impressão a frio com a argamassa, seria necessário alterar a programação do Marlin juntamente com os parâmetros do CURA, de forma que eliminasse os erros de proteção.

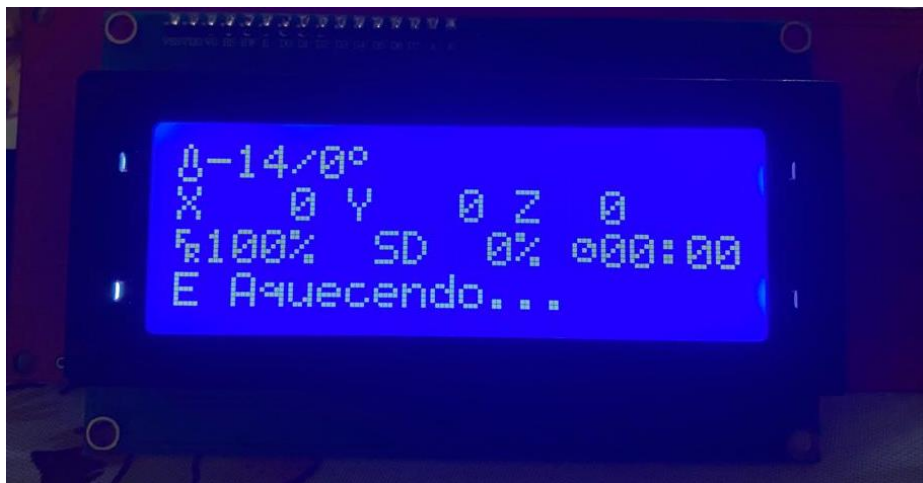
De volta ao fatiador, na ferramenta com as características do material a temperatura de impressão foi alterada de 200 para 0 graus levando em consideração a temperatura indicada no *display* no menu inicial durante a execução do *firmware*.

No código do Marlin foram alteradas as variáveis que determinam a temperatura mínima de trabalho também para 0 graus, e apagadas as linhas de código que habilitaram a proteção térmica do sistema. Linhas de código – 4, Anexo 1.

Inserindo o novo código no Arduino e a peça modificada no cartão SD, a simulação da impressora deu continuidade. Ao selecionar a peça o processo de impressão deu início, no entanto a placa entrou em um *loop* de aquecimento, e a impressão não ocorreu.

Sem componentes periféricos para aquecimento e registro de temperatura, apesar da definição da temperatura mínima em 0 graus o firmware durante sua execução não identificava qualquer temperatura, assim o *loop* de aquecimento era referente aos impulsos elétricos que a placa emite para que houvesse uma variação de temperatura, Figura 39.

Figura 39. *Loop* de aquecimento na tela de impressão.



Fonte: Autoria própria (2022).

Apesar da eliminação do erro E1 alterando o *firmware*, para realizar a impressão seria necessário modificar o hardware anexando a RAMPS dois componentes periféricos, um cartucho aquecedor, o mesmo utilizado para esquentar o HOTEND e um termistor para registrar a temperatura do cartucho.

Na busca de referências para aquisição dos componentes foi encontrado na teoria dos sensores térmicos uma alternativa para dar continuidade ao processo de impressão sem aquisição dos periféricos.

O termistor é um sensor que relaciona uma grandeza física com uma grandeza elétrica, nesse caso a temperatura e a resistência elétrica. À medida que a temperatura muda, o termistor varia sua resistência que a placa faz a leitura e associa a temperatura correta. Sabendo disso um componente que manualmente varia sua resistência e que pode ser inserido na RAMPS é um potenciômetro. Através da alteração da resistência de forma manual o firmware em execução

entenderia como o termistor registrando o aquecimento do HOTEND. Foi aplicado um potenciômetro de 10K ohms para substituir o conjunto termistor e HOTEND, Figura 40.

Figura 40. Potenciômetro de 10k ohms adotado.



Fonte: Autoria própria (2022).

O potenciômetro foi inserido nos terminais T1, referentes ao termistor do HOTEND. Com o *firmware* em execução a resistência foi alterada variando assim a temperatura indicada no *display*, validando a teoria dos sensores térmicos e possibilitando que a impressão ocorresse, Figura 41.

Figura 41. Registro de temperatura feito pela alteração da resistência do potenciômetro durante uma simulação de impressão.

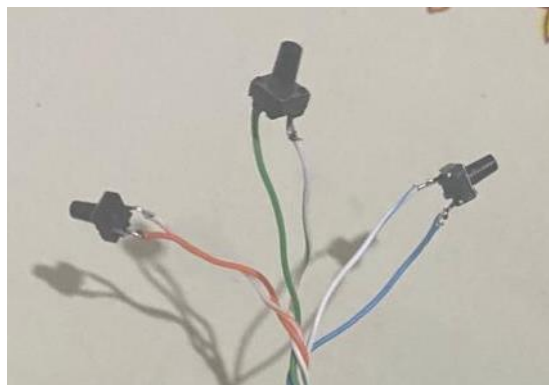


Fonte: Autoria própria (2022).

Segundos após início do processo de impressão, mais um erro encerrava o funcionamento dos motores. Na revisão do material bibliográfico foi constatado que o erro seria proveniente da ausência dos ENDSTOPS ou fins de curso. Esses componentes delimitam a posição HOME, a origem (0,0,0) do sistema para o mapeamento da impressora, antes de qualquer impressão é realizado esse posicionamento até a posição HOME de forma que qualquer alteração nos eixos não comprometesse a localização e deslocamento dos eixos.

A demarcação da origem é realizada por componentes nomeados de fins de curso, eles funcionam como interruptores que ao fechar contato o Arduino faz a leitura do sinal digital. Para esse sistema foram adotados 3 *push buttons*, referentes aos fins de curso para X, Y e Z, inseridos nos terminais Figura 42.

Figura 42. *Push buttons* adotados como fins de curso.



Fonte: Autoria própria (2022).

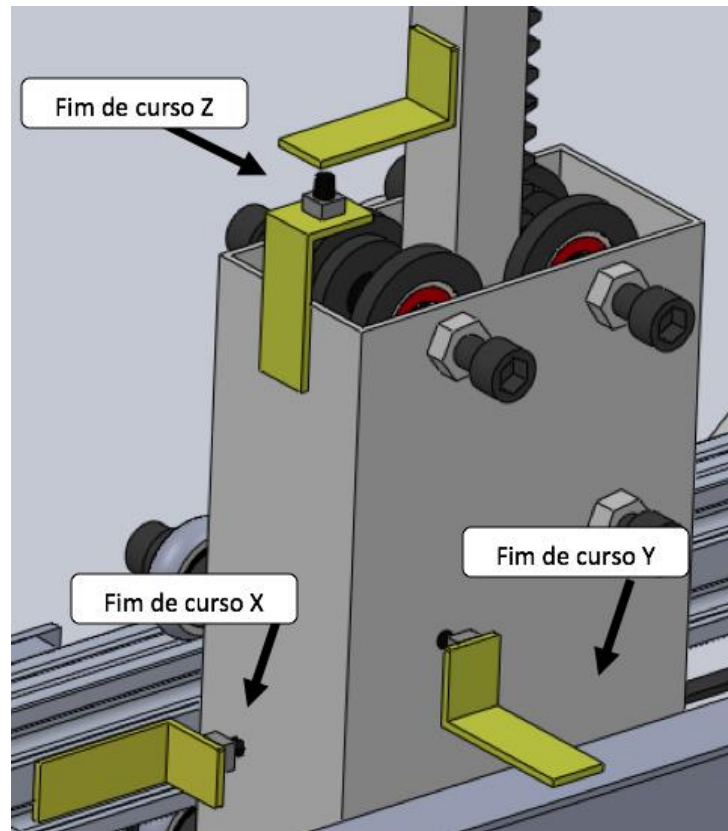
Como programado no código da Marlin para que os fins de curso representassem a posição mínima de cada eixo, eles teriam de ser fixos em posições específicas que permitissem o acionamento dos mesmos ao final do curso. Foram conectados a RAMPS nos terminais -X, -Y e -Z que representam a posição HOME (0,0,0).

Uma vez conectados a RAMPS, o acionamento está programado para ocorrer de forma individual em X, Y e Z respectivamente com o sinal binário 1,0,1 ou seja pressionado, solto e pressionado. Fazendo isso a simulação da impressão ocorreu com êxito.

Para o posicionamento correto dos fins de curso na estrutura mecânica um estudo foi realizado no modelo virtual, buscando a melhor forma de realizar o acionamento de todos os fins de curso de forma ordenada.

Como abordado anteriormente, apesar de cada eixo ser individual a movimentação ocorre de maneira combinada já que o eixo Z é fixo em X que também é fixo em Y. Isso implica na distribuição dos fins de curso que irá depender da movimentação combinada para que fossem acionados corretamente. Suportes foram modelados para posicionar de forma conveniente os fins de curso, Figura 43.

Figura 43. Modelagem dos suportes e posicionamento adequado dos fins de curso.



Fonte: Autoria própria (2022).

A comunicação entre a placa de Arduino os motores e os fins de curso ficaram a cargo de um cabeamento específico, no total seriam para cada eixo 7 ligações referentes a 2 cabos para o sinal do fim de curso, 4 cabos para alimentação do motor e 1 extra para aterramento.

Foi adotado um cabo de rede *Ethernet* por apresentar de forma compacta a possibilidade de realizar até 8 ligações independentes de forma simplificada, suprimindo a necessidade do projeto. Figura 44.

O dimensionamento do tamanho dos cabos foi realizado no software de modelação geométrica em função dos motores de cada eixo e o deslocamento realizado por eles.

Figura 44. Cabo de rede *Ethernet* utilizado para as ligações.



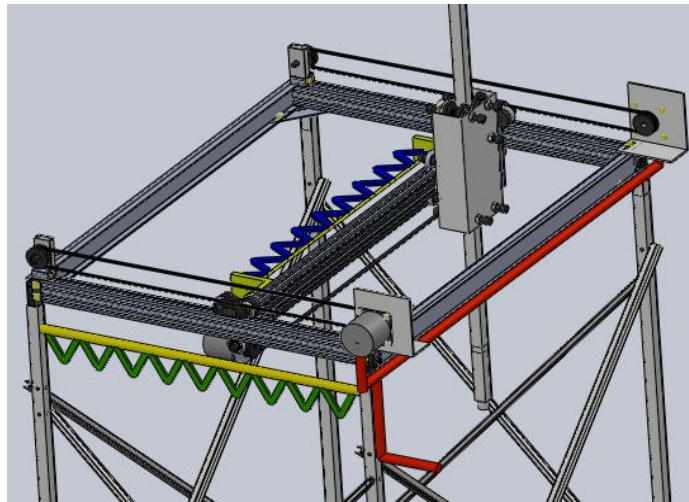
Fonte: Autoria própria (2022).

Devido ao motor do eixo X se encontrar fixo ao perfil móvel que por sua vez se desloca em função do eixo Y, por ser um único sentido para o motor do eixo X foi destinado um metro e meio de cabo. Meio metro para o deslocamento do motor fixo ao perfil móvel e um metro de folga entre máquina até a RAMPS. Ao eixo Y que possui seus dois motores fixos a estrutura estática, foi destinado um metro de cabo para espaçar a máquina até a placa eletrônica,

Para a movimentação no eixo Z foram aplicados dois metros de cabo que ligam o motor fixo ao carro móvel até a RAMPS. Como o eixo Z é diretamente ligado a movimentação dos eixos X e Y de forma que o carro móvel se movimenta livremente por toda área útil de impressão, do comprimento total do cabo destinado ao eixo Z meio metro seria correspondente a movimentação de X e meio metro correspondente a movimentação em Y, deixando um metro de folga da máquina até a placa eletrônica.

Em todos os eixos foram deixados de folga um metro de cabo, eles se encontram em um dos motores do eixo Y como ponto fixo e seguem até a RAMPS. De forma que os cabos acompanhassem o movimento dos motores quando estes se aproximam ao se afastam do ponto fixo, foi desenvolvido um sistema em cordas de aço, nelas os cabos seriam entrelaçados de modo que não interferissem na movimentação dos eixos, Figura 45.

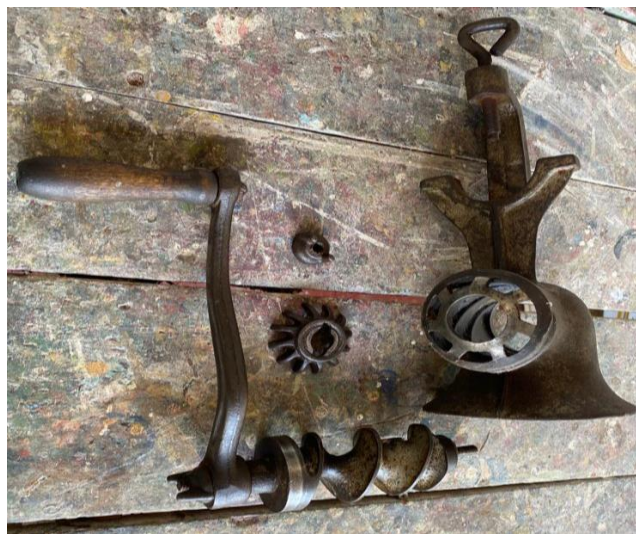
Figura 45. Dimensionamento do tamanho dos cabos com o software de modelação.



Fonte: Aatoria própria (2022).

O último subsistema a ser desenvolvido antes da instalação prática foi o mecanismo de extrusão da argamassa. Devido a complexidade desse mecanismo nos testes iniciais foi empregado uma máquina de moer, essa máquina possui uma rosca transportadora responsável por introduzir e impulsionar a argamassa por uma mangueira $\frac{3}{4}$ de polegada que percorrerá internamente toda a haste móvel do eixo Z, Figura 46.

Figura 46. Máquina de moer carne responsável pela extrusão da argamassa.



Fonte: Aatoria própria (2022).

A necessidade de uma mangueira para transportar a argamassa se dá pela possibilidade da massa solidificar, dessa forma seria necessário apenas a substituição da mangueira, não comprometendo a haste móvel.

A mangueira foi fixada a máquina de moer por intermédio de uma garrafa PET de 1 litro afinando a saída da massa até o diâmetro da mangueira. A garrafa por conta de suas propriedades termoplásticas foi moldada à geometria da máquina de moer por intermédio de uma fonte de calor, que fez a camada plástica se retraindo, Figura 47.

Figura 47. Mecanismo de extrusão da argamassa.



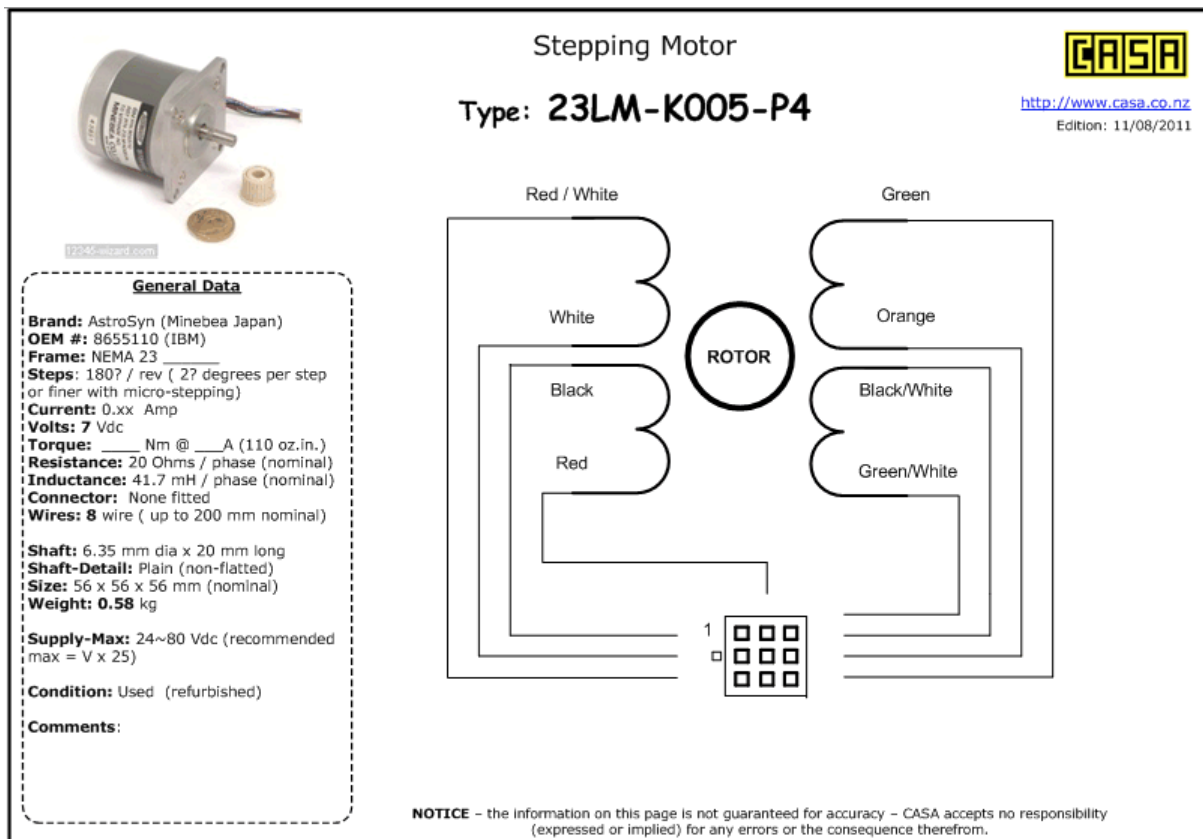
Fonte: Autoria própria (2022).

O mecanismo de transporte e extrusão da argamassa, não fez parte do escopo deste trabalho. Em projetos futuros espera-se, a realização de um estudo específico voltado para a automação do processo de deposição da argamassa. É uma área com um alto grau de complexidade devido às variáveis como a rigidez da de argamassa que necessita estar em um estado específico para a sobreposição das camadas, líquida demais as camadas não se sustentam e muito rígida não fluiria pela tubulação até a extrusão. Além das questões voltadas ao atrito da massa com os elementos mecânicos, o que provoca um desgaste prematuro.

Com o preparo do material eletrônico e as peças periféricas, deu-se início a implantação das mesmas no protótipo físico.

Primeiramente foi realizada a conexão dos cabos entre a RAMPS os motores e os fins de curso. O motor de passo 23LM-K005-20 é um motor unipolar com 8 cabos, para convertê-lo em um motor bipolar de 4 cabos foi necessário um estudo baseado em seu *datasheet*. Assim as bobinas em série foram interligadas por meio dos cabos (branco Fcom preto), (laranja com branco/preto), essas ligações se tornaram o *center tape* da bobina em série (vermelho/branco - vermelho) e (verde- verde/branco) respectivamente, Figura 48.

Figura 48. Esquema elétrico com as ligações correspondentes do motor 23LM-K005-20.



Fonte: CASA MODULAR SYSTEMS (2011).

Feita a ligação entre o motor do eixo X e a RAMPS, a próxima etapa foi ajustar a tensão de referência para o correto funcionamento do motor. Aplicando a equação: $V_{ref} = 8 * I_{ref} * R$

$$I_{ref} * R$$

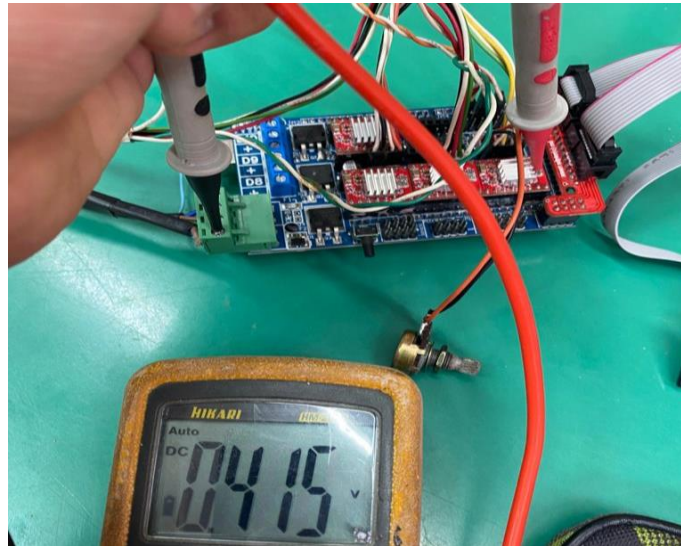
Onde:

R é o valor do resistor acoplado ao *driver* A4988 = 0,1 ohm;

A é a corrente de trabalho do motor 23LM-K005-20 = 1.2 Amperes

Aplicando 80% da corrente (0.96 A) de modo que o motor não trabalhe em sua capacidade máxima a tensão de referência foi calculada em 0,768 Volts. Esse valor foi ajustado no trimpot por intermédio do multímetro na escala de tensão contínua, Figura 49.

Figura 49. Ajuste manual do trimpot para 0,768 Volts.



Fonte: Autoria própria (2022).

No menu principal do Marlin indo a aba preparar, mover eixos, a movimentação foi verificada. Para o eixo Y o mesmo processo se repetiu, os dois motores 23LM-K005-20 responsáveis pela translação do perfil móvel foram ligados em paralelo, invertendo apenas a posição de uma das bobinas de forma que os motores trabalhassem de forma conjunta já que estavam espelhados.

A tensão de referência foi ajustada em 1 ampere levando em consideração que seria dividida entre os dois motores, havendo a necessidade de ser um tanto superior aos 0,768 Volts calculados anteriormente. De volta ao menu principal do Marlin, foi verificado também a movimentação correta do eixo.

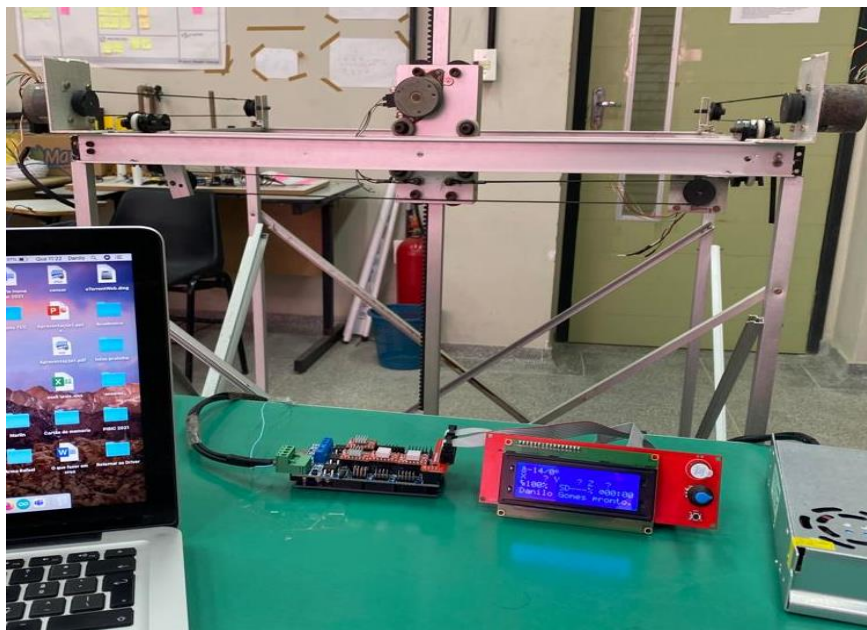
O eixo Z possui um motor diferente dos demais, um motor de passo unipolar com 6 cabos e sem referência alguma, para identificação das bobinas foi consultado o esquema elétrico de um motor unipolar com 6 cabos e foi verificado duas bobinas com um *center tape* cada, a próxima etapa seria então identificar quais cabos seriam o *center tape* de cada bobina e os pares das extremidades.

A identificação é realizada por meio de uma tabela de resistências medida entre todos os cabos com um multímetro na escala ôhmica. Através das resistências em comum são associados os pares das bobinas, o center tape é encontrado pela metade desse valor.

A tensão de referência em Z não pôde ser calculada devido a ausência de dados, dessa forma foi realizado um ajuste aumentando gradativamente o valor até que fosse o suficiente para alimentação do motor, dessa forma seria evitado um excesso de carga elétrica danificando o motor. A tensão de referência foi ajustada em 0.415 Volts.

A verificação de movimentação em z foi concluída e os sistemas mecânico e elétrico dos 3 eixos foram validados, Figura 50.

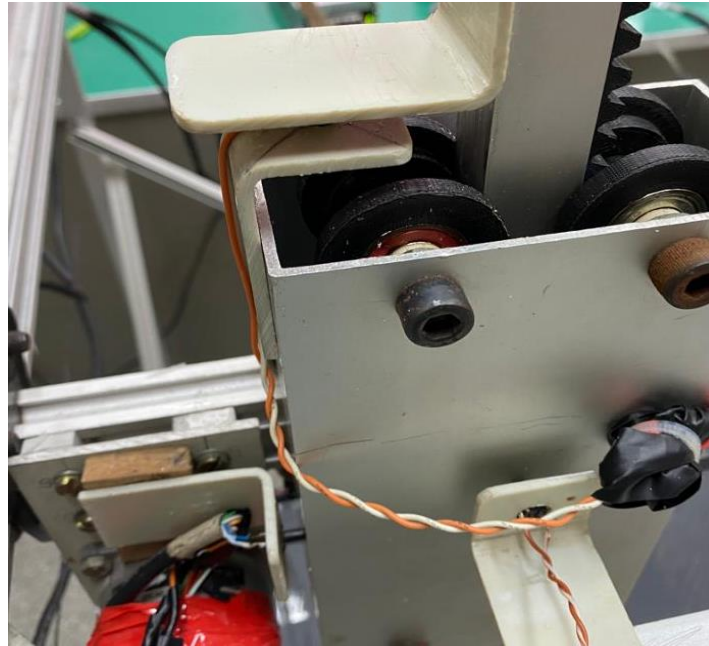
Figura 50. Verificação de movimento com os motores de passo.



Fonte: Autoria própria (2022).

A próxima etapa foi inserir os fins de curso na posição home, definindo as posições $X=0$, $Y=0$, $Z=0$, Figura 51. Com base no estudo prévio realizado no modelo virtual, os suportes foram confeccionados a partir de sucatas para serem posicionados de forma conveniente em cada eixo, seus terminais foram ligados nos pinos da RAMPS, -X, -Y, -Y indicando a posição mínima e criando um sentido crescente e decrescente para os eixos. O sentido de movimento facilmente pode ser alterado invertendo o *slot* de pinos dos motores.

Figura 51. Fins de curso anexados na posição home (0,0,0).

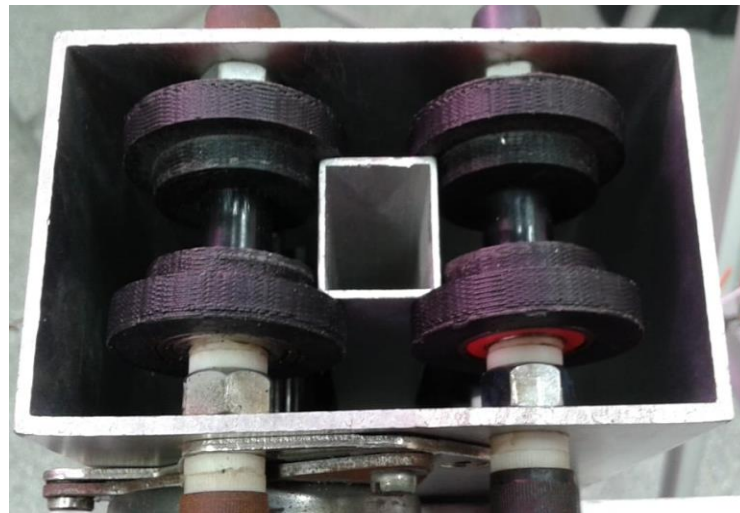


Fonte: Autoria própria (2022).

Com o movimento dos eixos correto, foi então verificado com uma fita métrica a área útil real disponível para o deslocamento, os valores correspondentes para X, Y e Z foram respectivamente 489, 404 e 400 milímetros. Por questões de segurança um limite foi estabelecido nas dimensões 480, 400 e 400 milímetros. Esses valores foram inseridos no código do Marlin como um parâmetro de comprimento total, não permitindo um deslocamento excessivo.

A redução da área útil nos eixos X e Y ocorreu pela medição da trajetória da haste, as medidas anteriores levavam em consideração todo o comprimento no eixo possível de deslocamento. Nos testes de movimento foi verificado que o carro móvel restringe por conta do seu perímetro o deslocamento da haste vertical, centralizada em seu interior, Figura 52.

Figura 52. Vista superior do carro móvel, limitado o deslocamento da haste centralizada em seu interior.



Fonte: Autoria própria (2022).

A redução considerável do eixo Z ocorreu devido ao comprimento da haste vertical inferior ao deslocamento permitido pelo eixo. Apesar da possibilidade de um deslocamento superior aos 790 milímetros adotados por limite de segurança, nos testes iniciais o deslocamento do eixo Z foi definido em 400 milímetros para que a haste trabalhasse em seu comprimento médio, não apresentando imprevistos provocados por trabalhar no limite do seu comprimento máximo.

Um painel de madeira foi adotado como mesa de impressão, ele foi forrado com uma lona plástica de forma que não absorvesse a umidade da argamassa que posteriormente seria depositada sobre ele. Para apoiar o painel uma estrutura de madeira foi posicionada de forma que o elevasse 400 milímetros do chão, dando a altura necessária para a haste trabalhar em seu comprimento médio, Figura 53.

Figura 53. Mesa de impressão e estrutura de elevação.



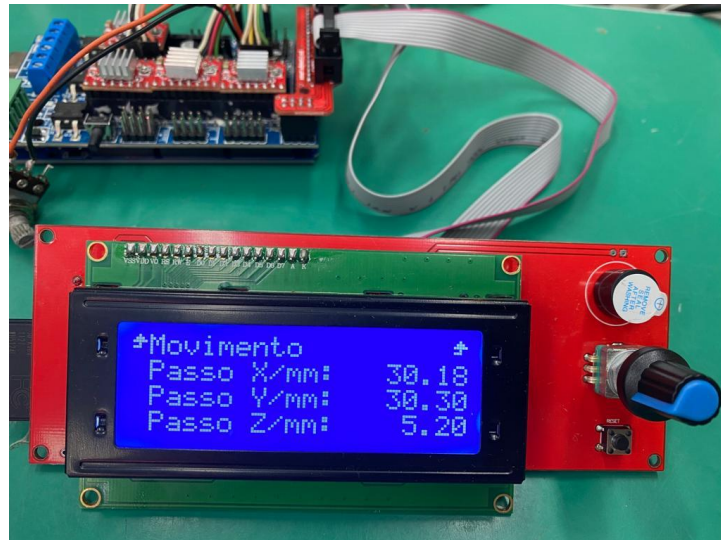
Fonte: Autoria própria (2022).

Outro parâmetro a ser configurado foram os passos por milímetro de cada eixo. Apesar de determinados por meio do cálculo, um ajuste fino nas casas decimais foi realizado manualmente direto no display com o *firmware* em execução, deixando a máquina mais precisa. No eixo Z que conta com um sistema de engrenagens foi adotado um valor arbitrário devido a falta de informações do motor, e complexidade para realização do cálculo, de forma experimental esse valor foi alterado até chegar em um deslocamento compatível com o que era esperado. A problemática em questão foi atingir o valor mínimo dos passos por milímetro por conta do sistema de engrenagens que ampliava de forma considerável o deslocamento linear.

A solução foi encontrada fazendo uma equivalência entre medidas de forma que o deslocamento efetivo seria o dobro do teórico, dessa forma ao ajustar a máquina para percorrer 5 milímetros ela iria deslocar 10 milímetros.

Os passos por milímetro de cada eixo ficaram definidos em 30.18 para o eixo X, 30.30 para o eixo Y e 5.20 para o eixo Z, Figura 54.

Figura 54. Configuração manual dos passos por milímetro.



Fonte: Autoria própria (2022).

Após montagem da estrutura e ajustes iniciais ocorreu a simulação da impressão do cubo, onde a trajetória dos eixos pode ser analisada devido a geometria simples do cubo, Figura 55.

Figura 55. Simulação de impressão.

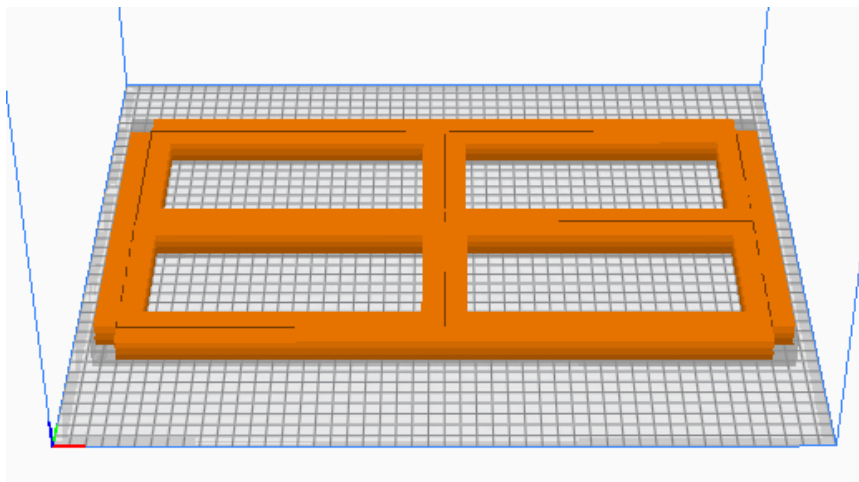


Fonte: Autoria própria (2022).

Com a impressora funcionando como esperado, para impressão utilizando argamassa houve a necessidade de alterar a geometria do segmento de parede virtual submetido a simulação, Figura 16-A. Foi desenvolvido um modelo retangular com filetes cruzados, levando em consideração a configuração feita no fatiador Ultimaker Cura para trajetória, e a situação do deslocamento dobrado no eixo Z, o que leva a confecção das peças com metade do tamanho real.

No fatiador a altura de de camada foi alterada para 5 milímetros, para que na prática a haste deslocasse 10 milímetros. 3 peças com altura variada foram fatiadas, no intuito de realizar testes ao sobrepor as camadas de argamassa, Figura 56.

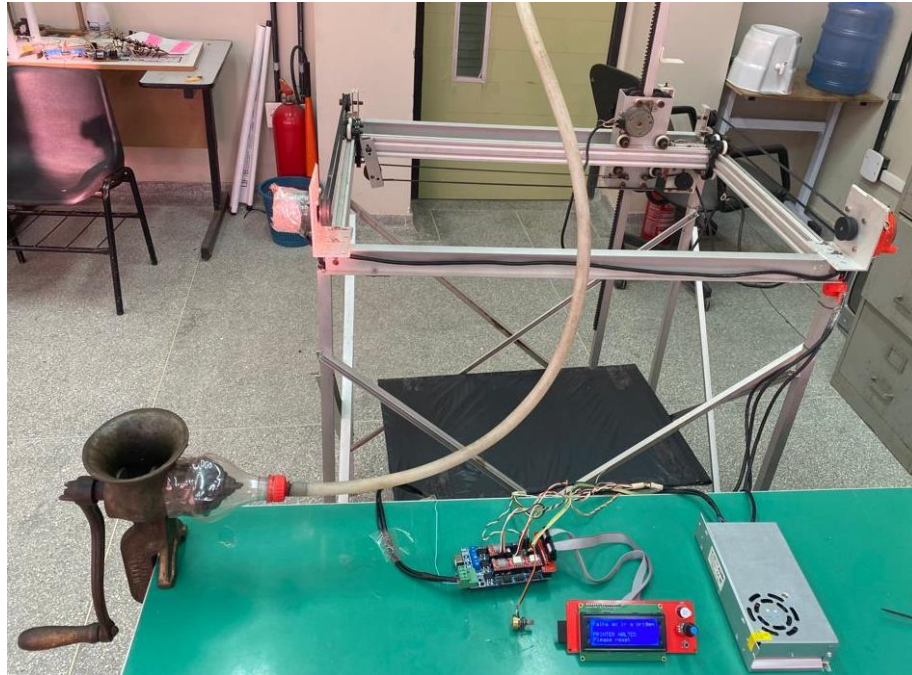
Figura 56. Geometria do segmento de parede fatiado.



Fonte: Autoria própria (2022).

Dando segmento ao processo de impressão, a extrusora manual foi anexada ao sistema e a mangueira com $\frac{3}{4}$ de polegada inserida na haste de Z. Com os elementos periféricos anexados, um estudo de movimento foi realizado, verificando o comportamento da mangueira tracionando e flexionando com o deslocamento máximo de cada eixo, em seguida uma simulação o foi realizada com a trajetória do segmento de parede, verificando o comportamento dos eixos com a carga adicional da mangueira, Figura 57.

Figura 57. Sistema completo para impressão do segmento de parede.



Fonte: Autoria própria (2022).

Durante a simulação foi inserido o sistema de deslocamento dos cabos de dados e alimentação. Conforme o estudo prévio no modelo virtual, dois cabos de aço mantiveram limitados a movimentação do conjunto de transmissão de dados e energia, trazendo organização e evitando acidentes.

Outra situação encontrada durante as simulações foi a necessidade de lubrificar o conjunto de translação do eixo Z, assim uma camada de óleo lubrificante foi inserida nos elementos móveis desse mecanismo, em especial na cremalheira que apresentava ruídos devido ao atrito, evitando assim principalmente o desgaste prematuro destas peças.

Concluindo as alterações, foram inseridas 4 sapatas de borracha nos “pés” da estrutura, evitando vibrações e ruídos apresentados durante as simulações.

Para impressão, uma massa foi preparada com as proporções de 3 partes de argamassa para uma de água. A argamassa utilizada para o projeto foi a cimentcola® interno da marca QUARTZOLIT®, tipo AC-I com 20 quilos. Figura 58.

Figura 58. Argamassa cimentcola interno QUARTZOLIT, pacote com 20 quilos.



Fonte: Autoria própria (2022).

O processo de extrusão funcionou até certo ponto, à medida que a massa avançava pelo comprimento da mangueira o atrito aumentava e impedia o avanço da massa. Com o fluxo bloqueado a extrusora manual começou a apresentar vazamentos pelas folgas do sistema mecânico, Figura 59 (A).

Buscando solucionar o problema do atrito, uma nova massa mais fluida foi preparada com 3 porções de argamassa para uma porção e meia de água. Sem resultados positivos a massa mais líquida levou a mais vazamentos, o avanço da argamassa não ocorreu já que o atrito entre a massa e a mangueira é maior que a força de extrusão da máquina de moer, que é reduzida ainda mais pelos vazamentos.

O uso da máquina de moer como extrusora, apesar de um processo manual traria uniformidade para a deposição de argamassa, no entanto após as tentativas mal sucedidas esse subsistema foi descartado, havendo a necessidade de um replanejamento para esse processo.

A deposição de argamassa exige um estudo direcionado para elaboração de um mecanismo eficiente onde além da automação no processo, devem ser levados em consideração a força aplicada superior ao atrito da mangueira com a massa, a ausência de folgas e o alto desgaste provocado pelos grãos de areia presente na argamassa.

Outro fator condicionado ao sistema de extrusão é a sobreposição das camadas, uma massa muito líquida fluiria melhor pelo sistema, no entanto não suportaria as camadas

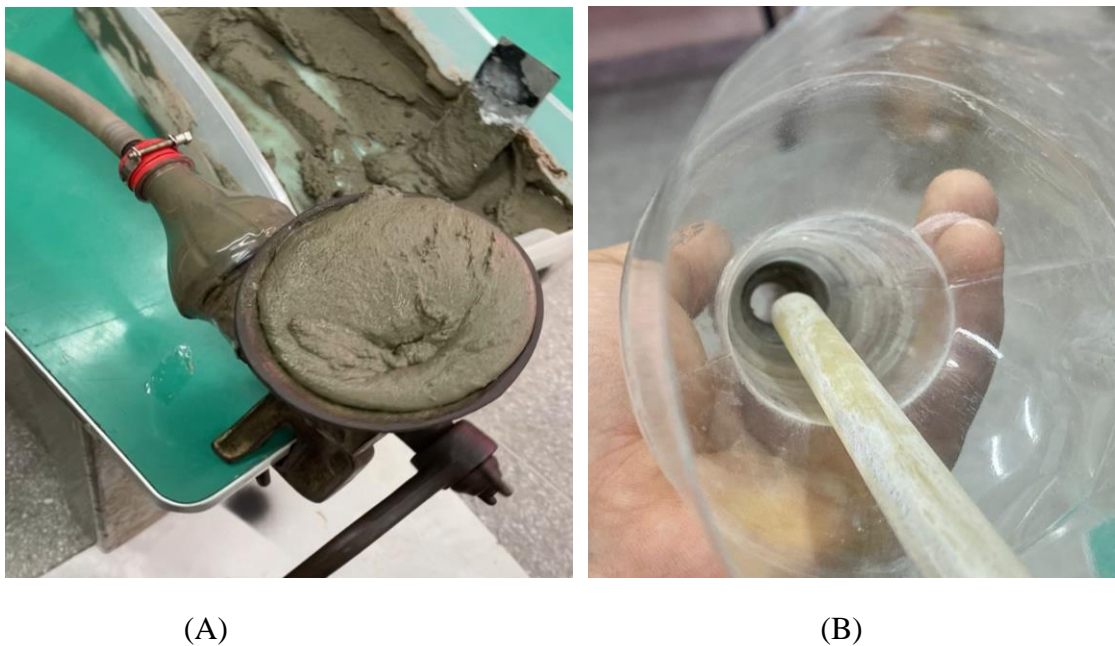
sobrepostas, havendo a necessidade de um sistema de *HOTEND* onde a alta temperatura na extremidade removeria o excesso de umidade da massa fluida, a tornando mais sólida. Funcionando de forma inversa ao sistema de impressão 3D padrão onde a matéria prima sólida se torna fluida.

Além de um sistema de extrusão mecânico por uma rosca helicoidal, novos sistemas poderão ser elaborados com mecanismos pneumáticos, por exemplo.

Um sistema de deposição simplificado foi elaborado levando em consideração a ação da gravidade. Uma garrafa PET foi utilizada como funil direcionando a massa diretamente para a haste sem intermédio da mangueira de forma a reduzir o atrito, no entanto sujeitando a haste aos danos provocados pelo contato direto com a argamassa que pode solidificar-se. Esse procedimento foi adotado de forma que desse continuidade ao projeto durante os testes iniciais.

Além da ação gravitacional, um bastão de silicone foi adotado para controlar o escoamento da massa com a função de válvula, e empurrar a massa com a função de êmbolo, Figura 59 (B).

Figura 59. (A) Mecanismo de extrusão da argamassa. **Figura 59. (B)** Mecanismo alternativo para extrusão da argamassa.



Fonte: Autoria própria (2022).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os subsistemas preparados para impressão foi possível realizar a deposição da primeira camada do segmento de parede com uma massa com a proporção de 3 partes de argamassa para uma de água. Apesar da falha na geometria devido ao escoamento da argamassa, foi possível verificar que a máquina suportou o peso do funil com argamassa e realizou todo o trajeto corretamente já demarcado na lona para uma comparação. Outro fator que pode ser verificado é a correta sobreposição das camadas, Figura 65.

Figura 65. Mecanismo secundário de extrusão da argamassa.

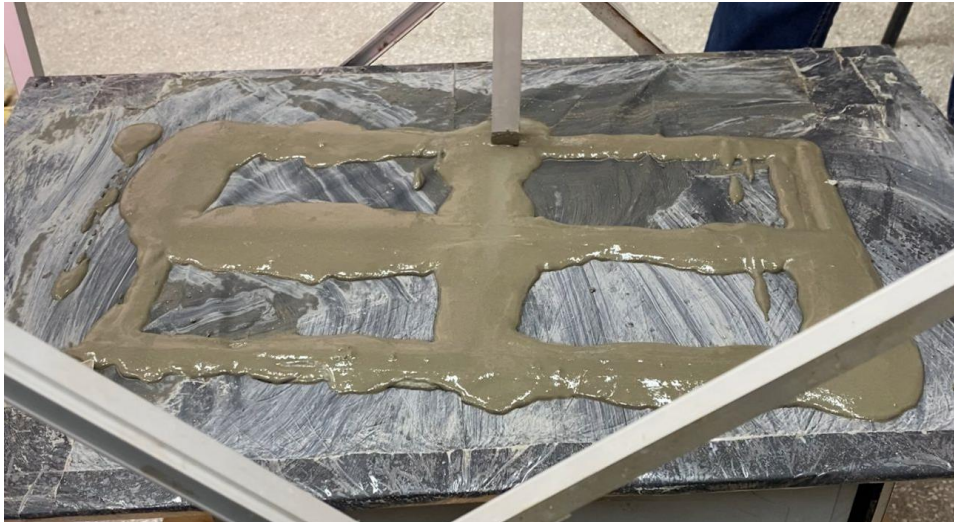


Fonte: Autoria própria (2022).

Os próximos passos foram realizar diversos testes de impressão alterando a traço da argamassa pela adição ou remoção de água de modo que a massa fique relativamente fluida.

Para contornar a questão do escoamento, uma massa mais líquida foi preparada com uma proporção de 3 partes de argamassa para uma parte e meia de água. A deposição foi realizada sem interrupção por todo o trajeto, entretanto como esperado as camadas acabam escoando, não assumindo uma geometria definida, Figura 66.

Figura 66. Camada única do segmento de parede com uma massa de proporção 3 partes de argamassa para uma e meia de água.



Fonte: Autoria própria (2022).

Para evitar o escoamento, uma massa mais sólida foi preparada com as proporções de 4 porções de argamassa para uma de água. Com essa mistura o filete ficou bem definido, entretanto foi encontrado dificuldade no escoamento e a geometria do segmento de parede apresentou falhas, Figura 67.

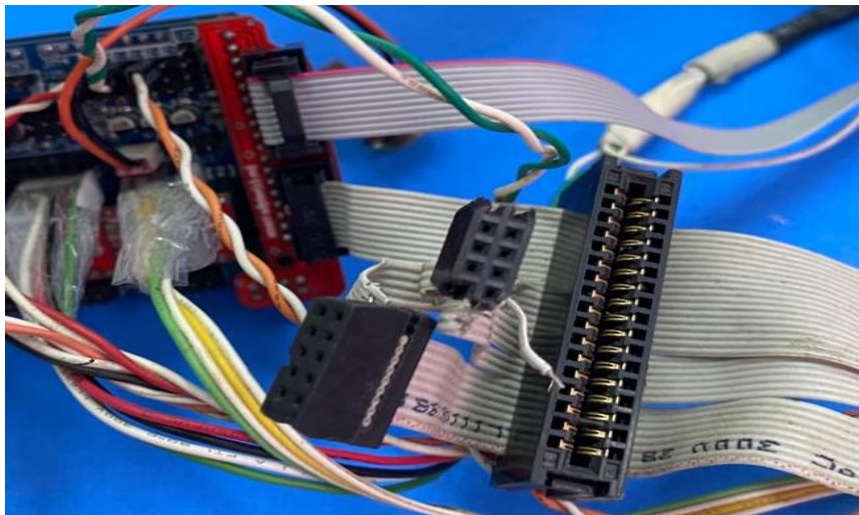
Figura 67. Camada única do segmento de parede com uma massa de proporção 4 partes de argamassa para uma de água.



Fonte: Autoria própria (2022).

Durante a impressão das camadas, um erro ocorria na identificação do cartão SD com o código G. Após pesquisas em fóruns de situações similares os usuários relataram que resolviam o problemas habilitando o parâmetro de SD suporte no código do Marlin, ou substituindo o *slot* do Cartão, no entanto a solução foi encontrada substituindo os cabos de conexão do *display* onde vem o cartão SD anexado. Pela ausência de um cabo idêntico, um similar foi adaptado com um cabo de HD IDE, Figura 68.

Figura 68. Cabo de um HD IDE adaptado para a entrada do *display*.



Fonte: Autoria própria (2022).

Continuando os testes, uma mistura intermediária foi preparada no estado pastoso com as proporções de 1 parte de água para 3 partes de argamassa. O resultado foi satisfatório mantendo a geometria do segmento sem apresentar muita deformação.

Através da sobreposição das camadas é possível verificar a deformação apresentada na massa recém depositada em comparação a que sofreu escoamento com o passar do tempo, Figura 69.

Figura 69. Camada única do segmento de parede com uma massa de proporção 3 partes de argamassa para uma de água.



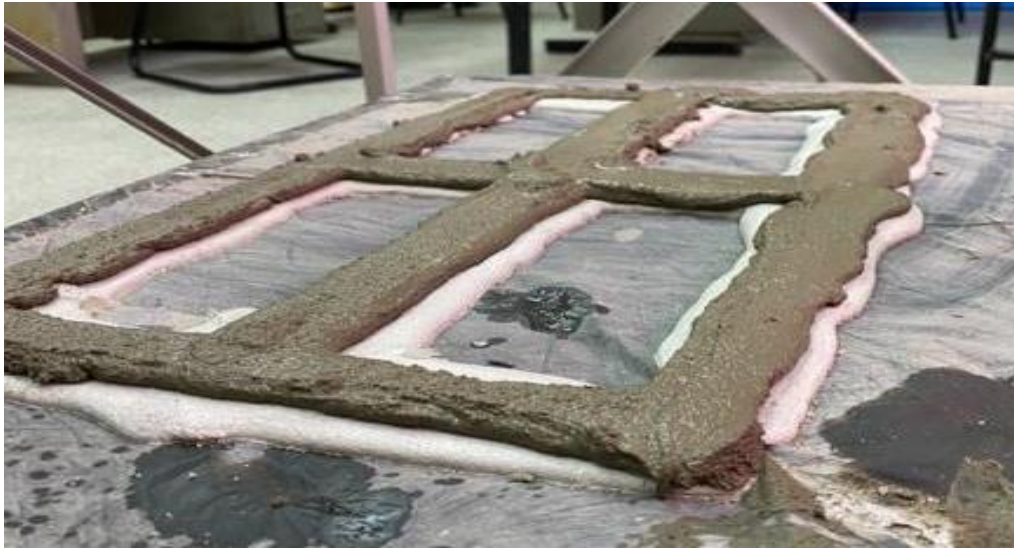
Fonte: Autoria própria (2022).

Para sobreposição de mais camadas de forma a minimizar a ação do escoamento foi esperado um tempo de cura de uma semana para remoção da umidade e antes de iniciar o processo de impressão uma alteração foi realizada no mecanismo que movimenta a haste em Z de forma que a deposição da camada seguinte ocorresse sobre a anterior, já que o processo foi interrompido para cura da massa e reiniciado.

Apesar da programação ser realizada para 10 milímetros de altura do filete, com o escoamento a altura de camada foi reduzida pela metade, assim o ponto inicial foi deslocado 5 milímetros positivos em Z alterando a posição do acionador do fim de curso apresentado na Figura 61.

Mais uma camada foi depositada com a mesma proporção de uma parte de água para 3 de argamassa. A diferença entre a camada com o tempo de cura e a recém depositada pode ser verificada pela cor, onde a mais clara indica a ausência de umidade, Figura 70.

Figura 70. Segmento de parede com a sobreposição de camadas.



Fonte: Autoria própria (2022).

A deposição de mais camadas exigia que a camada anterior suportasse o próprio peso e de mais uma camada sobre ela. Tornando inviável a espera de uma semana de tempo de cura além do ajuste no ponto zero no eixo Z para a deposição de mais camadas. A solução encontrada foi a remoção parcial da umidade com uma fonte de calor, para isso foi utilizado um maçarico onde a chama era suavemente colocada em contato com a massa, Figura 71.

Figura 71. Utilização do maçarico para remoção parcial da umidade a fim de sobrepôr mais camadas .



Fonte: Autoria própria (2022).

Com intermédio do maçarico, mais camadas foram depositadas, concretizando o objetivo do projeto de imprimir um segmento da parede. Apesar do processo manual de abastecimento e direcionamento de argamassa, o que levou a não uniformidade das camadas, as primeiras impressões do resultado foram consideradas satisfatórias para um projeto experimental preliminar. Alterações futuras serão realizadas onde será buscado uma automação para o processo de extrusão e secagem da massa recém depositada, Figura 72.

Figura 72. Primeira versão do segmento de parede impresso com o processo de extrusão manual.



Fonte: Autoria própria (2022).

Com 9 camadas de filetes, dados técnicos puderam ser coletados. Começando pela quantidade de massa depositada por unidade de comprimento do caminho, pelas condições configuradas de altura do filete e a largura da haste foi medido e calculado para cada camada uma geometria de 29000 mm^2 que leva uma deposição de 290000 mm^3 de argamassa para cada camada, equivalente a 290 mililitros.

Com a velocidade ajustada para 20 mm/s , uma passagem leva 75 segundos e a cada segundo a impressora injeta 3867 mm^3 de argamassa, calculados pelo dimensionamento geométrico da parede e medidos pelo comprimento do segmento impresso e cronometrado pelo tempo de impressão.

Para cada camada a mesma trajetória é realizada duas vezes, o que duplica os resultados apresentados para uma passagem. A trajetória dupla é consequência do fatiamento cujo tem o

intuito de preencher uma geometria, para uma trajetória a maneira mais simplificada apresentada pelo software foi com um duplo filete.

Dessa forma o tempo de impressão por camada passa a ser 2 minutos e 30 segundos com a passagem dupla, que injetam $580\,000\text{ mm}^3$ de argamassa, Figura 73.

Figura 73. Deposição dupla da argamassa.



Fonte: Autoria própria (2022).

Para os cálculos foram utilizadas as medidas, 5 milímetros de altura de camada, apesar da programação para 10 milímetros foi verificado que o escoamento da massa eleva a metade da altura. A largura foi adotada com 15 milímetros referente a concentração cilíndrica da massa para o escoamento no interior da haste que mesmo quadrada, o escoamento depositava camadas cilíndricas.

Com a passagem dupla, as camadas de 15 milímetros se fundiam e escoavam, se tornando uma camada de 30 milímetros com 5 milímetros de altura, Figura 74.

Figura 74. Medição do resultado impresso.



Fonte: Autoria própria (2022).

A altura de 5 milímetros por camada é verificada nas 9 camadas depositadas, Figura 75.

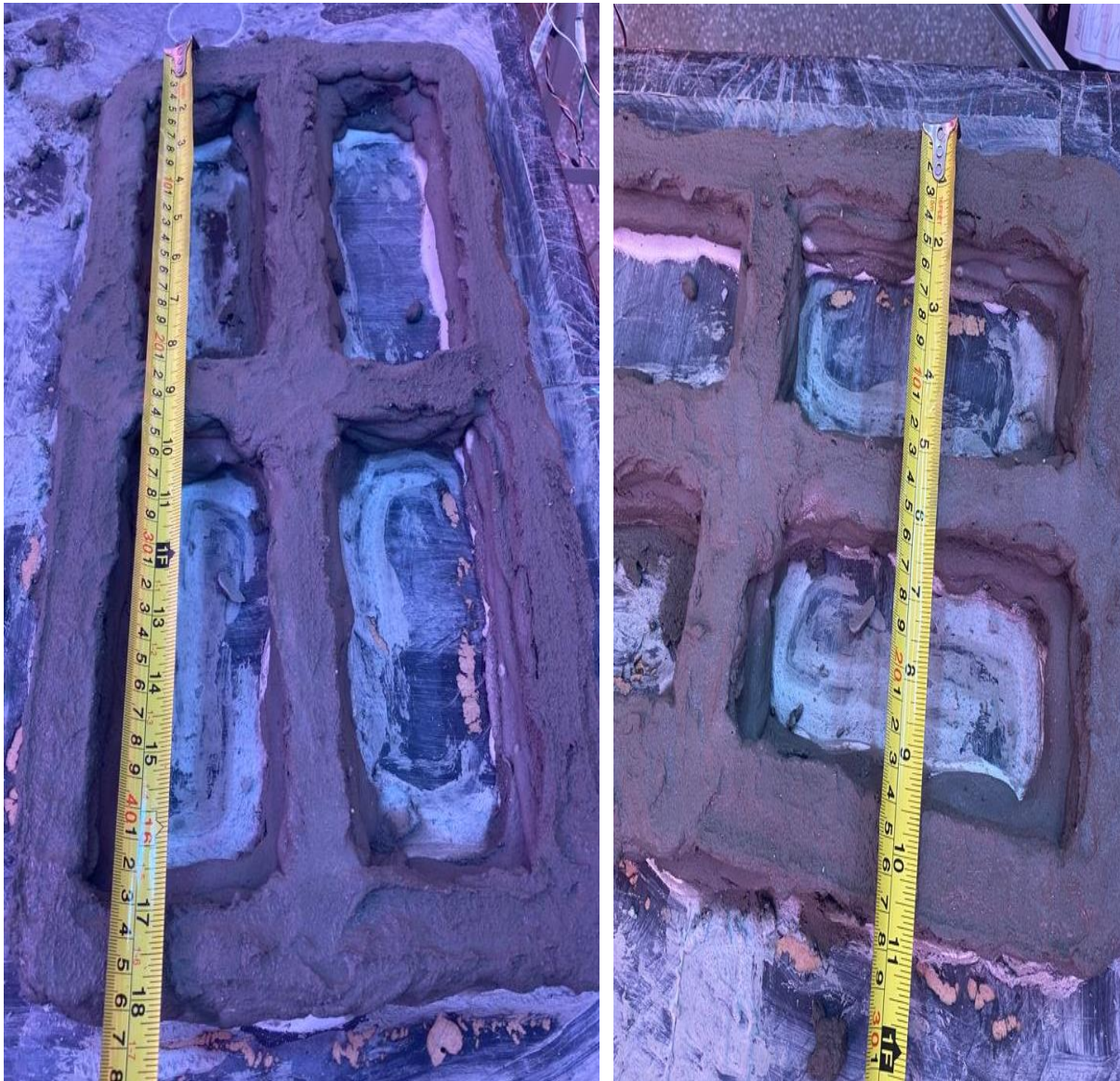
Figura 75. Medição de 5 milímetros por camada.



Fonte: Autoria própria (2022).

O comprimento e largura total do segmento de parede impresso também foi medido e de forma satisfatória validado o resultado previsto com o escoamento, 465 milímetros teóricos de comprimento, Figura 76 (A). E 265 milímetros teóricos de largura, Figura 76 (B).

Figura 76. (A) Medição prática do comprimento do segmento de parede com 46.5 milímetros. (B) Medição prática da largura do segmento de parede com 26.5 mm.



Fonte: Autoria própria (2022).

5. CONCLUSÃO

Através da construção da impressora 3D para edificações, foi possível entender os aspectos preliminares de desenvolver uma tecnologia ainda em estágio embrionário no Brasil, disseminando informações e dados referentes a pesquisa nesse campo, importante para pesquisadores gerarem novos estudos relacionados ao tema no Brasil.

Durante a elaboração de cada etapa da impressora foi possível ter contato direto com diversos aspectos da engenharia iniciando com a modelagem, onde foi constatado a importância de um software CAD no desenvolvimento de qualquer projeto. Por meio do modelo virtual as falhas são localizadas e solucionadas de maneira que não sejam reproduzidas no modelo real, evitando perda de tempo com retrabalho, e dinheiro com novos materiais. Em seguida, a partir do modelo virtual, o protótipo foi fabricado com as peças reutilizadas.

Ainda em fase inicial os primeiros testes de resistência da parede impressa foram executados virtualmente, por meio de dados colhidos com as propriedades da argamassa com traço 1:1:6. Apesar dos testes se mostraram satisfatórios, fazendo comparação ao modelo tradicional em alvenaria, nos passos futuros com a automatização completa do processo, com um estudo direcionado as propriedades da argamassa a ser impressa é de se esperar melhores resultados práticos, a partir da manipulação das propriedades químicas da massa em especial pela adição de polímero, melhorando ainda mais suas propriedades físicas.

Por conta da suspensão das atividades acadêmicas devido a pandemia de covid 19 que assolou o planeta, as atividades do projeto Home Printer deram segmento de forma remota onde deu-se início as pesquisas, testes e simulações referentes a introdução dos aparelhos eletrônicos e automação do movimento dos eixos. Regressando ao laboratório foram configurados e implementados os aparelhos eletrônicos tornando possível a real impressão do segmento de parede, finalizando com os resultados obtidos das camadas sobrepostas que se mostraram satisfatórias para os testes iniciais.

Com base no estudo realizado durante este trabalho, se pode afirmar que, a impressão em 3D para deposição da argamassa ou concreto, é uma realidade que poderá vir a ser utilizada de forma comercial. Através da elaboração deste protótipo, um passo importante foi

dado ao desenvolvimento de equipamentos mais complexos e de porte maior, trazendo avanços na automação da construção civil.

6. SUJESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

É de se esperar que este trabalho dê continuidade ao surgimento de novas pesquisas que levem ao melhoramento contínuo da impressão de argamassa. Assim como o desenvolvimento do protótipo envolveu questões associadas aos segmentos da engenharia, mecânica, elétrica, da computação e civil. Para estas um leque de possibilidades é aberto com a concretização dos testes iniciais.

Na engenharia mecânica em especial é esperado a construção de um mecanismo autônomo para deposição da argamassa, também como questões dos mecanismos que podem ser alterados para ampliação da área de impressão.

Para o segmento da engenharia civil há espaço para o melhoramento por manipulação e variação do material impresso. Se destacando os materiais recicláveis.

Na engenharia elétrica, novas pesquisas podem ser direcionadas para o desenvolvimento de um material eletrônico que suporte a uma máquina em maior proporção com atuadores mais robustos.

Para engenharia da computação, um melhoramento nas condições do fatiamento podem ser geradas a partir da manipulação do fatiador de forma a criar um software direcionado para os fins da extrusão de argamassa.

A todo momento são buscadas parcerias, que venham somar no aperfeiçoamento desse projeto, no intuito sejam fabricadas máquinas com capacidade produtiva para as demandas da construção civil buscando qualidade, rapidez e baixo custo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL3DAN 3D. **Principle of Operation.** Core XZ, 2018. Disponível em: <https://www.corexz.com/theory.html>. Acesso em: 6 jan. 2022.

AUTODOC. **Impressão 3D: como essa tecnologia se aplica na construção civil?** Disponível em: <https://site.autodoc.com.br/conteudos/impresao-3d-como-essa-tecnologia-se-aplica-na-construcao-civil/>. Acesso em: 10 jan. 2022.

BASTOS, Pedro Kopschitz Xavier; LEMONGE, Afonso Celso de Castro; SIGILIANO, Vitor Sathler; RESENDE, Sheyla Castro. **Estudo do Módulo de Elasticidade de Argamassas de Revestimento Sujeitas à Sucção de Água pela Base.** Engenharia, Minas Gerais, 2010. Disponível em: https://www.apfac.pt/congresso2010/comunicacoes/Paper%20105_2010.pdf. Acesso em: 06 fev. 2022.

BERNARDES, Maurício. **Impressão em 3d na construção: em breve uma realidade em escala.** Jornal da Construção, [S. l.], ano 4, n. 33, p. 12-13, 1 fev. 2017. Disponível em: <https://sindusconce.com.br/wp-content/uploads/2017/10/ed-33-1.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2022.

CASA MODULAR SYSTEMS. **STEPPING MOTOR TYPE: 23LM-K005-P4.** 2011. Disponível em: https://www.casa.co.nz/motors/stepper/23LM-K005-P4-Schem_files/gif_1.htm. Acesso em: 23 fev 2022.

CARVALHO, Sueid pereira de. **SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA ROBÓTICO PRISMÁTICO PARA IMPRESSÃO DE EDIFICAÇÕES.** Disponível em: https://ufrb.edu.br/engenhariamecanica/images/TCC/TCC_Eng._Mecanica_-_Sueid_Carvalho_-assinada.pdf. Acesso em: 06 mar. 2022.

CELERE. **Impressão 3D na construção civil: cenário atual e perspectivas de futuro.** Disponível em: <https://celere-ce.com.br/construcao-civil/impresao-3d-na-construcao-civil/>. Acesso em: 10 jan. 2022.

CHÁVEZ, César. **Mecanismo de SolidWorks a Matlab Simulink usando Simscape multibody (Tutorial paso a paso - 2/3).** Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=zTvxDovgsyk&t=187s>. Acesso em: 07 fev. 2022.

CHIP, Twins. **A4988 STEPPER MOTOR DRIVER.** Disponível em: https://www.twinschip.com/A4988_Stepper_Motor_Driver. Acesso em: 07 fev. 2022.

CLUBE CNC BRASIL, **Tópico: Como saber quais os eixos da máquina.** Clube CNC Brasil, 15 jun 2013. Disponível em: <https://www.clubecncbrasil.com.br/clubecnc/index.php?topic=5325.0>. Acesso em: 6 jan. 2022.

DICOMP. **O que é impressão 3D?** Disponível em: <https://www.dicomp.com.br/zortrax/projects/o-que-e-impresao-3d/>. Acesso em: 10 jan. 2022.

EDWARD, Mina. **Plotting with a 3 axis CNC router in Matlab, Labview and Solidworks.** 2015. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=53suySbDu5o>. Acesso em: 07 fev. 2022.

ELETROGATE. **Tudo sobre DRIVER A4988 e Motor de Passo > Usando o Arduino.** 2018. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/driver-a4988-motor-de-passo-usando-o-arduino/>. Acesso em: 10 fev 2022.

ENGETAX ELEVADORES. **A impressão 3D revolucionará a construção civil?** Disponível em: <https://engetax.com.br/impresao-3d-na-construcao-civil/>. Acesso em: 10 jan. 2022.

ESTATÍSTICAS ECONÔMICAS (ed.). **Em maio, Índice Nacional da Construção Civil foi de 1,78%.** [S. l.]: Estatísticas Econômicas, 9 jun. 2021. Disponível em:

<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/30891-em-maio-indice-nacional-da-construcao-civil-foi-de-1-78>. Acesso em: 06 fev. 2022.

FARIAS, J. **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica do Método Construtivo Light Steel Framing numa Residência Unifamiliar de Baixa Renda**, Projeto de Graduação, UFRJ, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2013. Acesso em: 10 jan. 2022.

FILAMENT2PRINT. **COMO ESCOLHER O HOTEND CORRETO**. 2020. Disponível em: https://filament2print.com/pt/blog/96_Como-escolher-o-hotend-correto.html. Acesso em: 23 fev 2022.

FLOP, Filipe. **Driver Motor de Passo A4988**. Disponível em: <https://www.filpeflop.com/produto/driver-motor-de-passo-a4988/>. Acesso em: 07 fev. 2022.

FLORÊNCIO, E.Q. et al. **O futuro do processo construtivo? A impressão 3d em concreto e seu impacto na concepção e produção da arquitetura**. In: CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBERO-AMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL, Não use números Romanos ou letras, use somente números Arábicos., 2016, Buenos Aires, Argentina. O futuro do processo construtivo? A impressão 3d em concreto e seu impacto na concepção e produção da arquitetura. Buenos Aires, Argentina: Sigradi, 2016. p. 9-11. Acesso em: 10 jan. 2022.

GARDNER, M., ALWI, A., KARAYIANNIS, S., et al. **Construktio, MegaScale 3D Printing**. University of Surrey, 2013.

GUARNIZO, José. **Tutorial para conexión entre Labview y SolidWorks**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=QSZ3AUKizC4&t=1s>. Acesso em: 07 fev. 2022.

KHOSHNEVIS, Behrokh. **Contour crafting: automated construction: Behrokh Khoshnevis at TEDxOjai. Youtube**. [S. l.]: TEDx Talks, 2012. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=JdbJP8Gxqog>. Acesso em: 10 jan. 2022.

LOPES, E.J. **Implementação de estratégias de controle em uma impressora 3D**. 2017. 63 f. Monografia (Doutorado) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017. Acesso em: 10 jan. 2022.

MACIEL, Geraldo de Freitas; BARBOSA, Mônica Pinto; PEREIRA, Joao Batista. **Análise comparativa da tensão limite de escoamento de argamassas por meio da técnica de Pashias e reometria rotacional**. Construção Civil, Rio de Janeiro, v. 21, ed. 4, 2016. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762016000400866&script=sci_arttext. Acesso em: 06 fev. 2022.

MAKER, Arduíno. **Como controlar motor de passo NEMA com driver A4988 – Botão de direção e potenciômetro p/ velocidade**. 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=QdqubmbgW5M>. Acesso em: 10 fev 2022.

MARTINELLI, Juliana. **Brasil constrói sua primeira casa modelo impressa em 3D!**. [S. l.], 8 jul. 2020. Disponível em: <https://www.inovahouse3d.com.br/post/brasil-constrói-sua-primeira-casa-modelo-impressa-em-3d>. Acesso em: 06 fev. 2022.

TECHTUDO. **Empresa chinesa constrói primeiro edifício do mundo com uma impressora 3D**, 21 jan. 2015. Disponível em: <https://www.techtudo.com.br/noticias/2015/01/empresa-chinesa-constroi-primeiro-edificio-do-mundo-com-uma-impressora-3d.ghtml>. Acesso em: 20 fev. 2022.

MENEZES, Maykow da Silva. **Plataforma CAD para elaboração de projetos e gerenciamento e controle de impressão 3D com ênfase na construção civil**. 2020. 60 p Monografia. (Curso de bacharelado em engenharia Civil) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Câmpus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2020. Acesso em: 06 fev. 2022.

MOHAMAD, G.I.; NETO, A.B.da S.S.; PELISSER, F.; LOURENÇO, P.B.; ROMAN, H.R. **Caracterização mecânica das argamassas de assentamento para alvenaria estrutural –**

previsão e modo de ruptura. 2. ed. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762009000200006&lang=en. Acesso em: 06 fev. 2022.

MOHAMAD, P.; LOURENÇO, P. B.; ROMAN, H. R. **Propriedades mecânicas das argamassas sob compressão triaxial-análise e previsão.** Engenharia Estrutural, Campinas, p. 1-10, 2006. Anais das XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, 2006, Campinas. Acesso em: 10 jan. 2022.

NERY, Gustavo. **Guia definitivo de uso da Ponte H L298N.** Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/guia-definitivo-de-uso-da-ponte-h-l298n/>. 2020. Acesso em: 15 jan. 2022.

OLIVEIRA, Fabiana Lopes de. Ensaios de paredes de alvenaria submetidas a compressão axial. In: OLIVEIRA, Fabiana Lopes de. **Reabilitação de paredes de alvenaria pela aplicação de revestimentos resistentes de argamassa armada.** 2001. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, [S. l.], 2001. Acesso em: 10 jan. 2022.

PACHECO, Adriano. **A impressão 3D no mercado da construção civil.** Disponível em: <https://maisengenharia.altoqi.com.br/estrutural/impressao-3d-mercado-da-construcao-civil/>. Acesso em: 10 jan. 2022.

POLI NÁUTICO. **Usinagem CNC e Código G.** 2020. Disponível em: <https://www.polinautico.com/post/usinagem-cnc>. Acesso em: 10 jan. 2022.

PORTO, T.M.S. **Estudo dos avanços da tecnologia de impressão 3D e da sua aplicação na construção civil.** 2018. 80 f. TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Acesso em: 10 jan. 2022.

SILVA, A.C.P. **Exemplos de Aplicação de Impressão 3D na Construção**. 2019. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019. Acesso em: 10 jan. 2022.

SILVA, Narciso Gonçalves da; CAMPITELI, Vicente Coney. **Módulo de Elasticidade Dinâmico de Argamassas de Revestimento**. Engenharia, II Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, p. 1-9, 2008. Disponível em: http://www.pg.utfpr.edu.br/ppgep/anais/artigos/eng_civil/50%20MODULO%20ELASTICIDADE%20DINAM%20ARGAMASS%20REVESTIM.pdf. Acesso em: 06 fev. 2022.

STEVENSON, Kerry. **Are CoreXY 3D Printers Taking Over?** Fabbaloo, March 9th, 2020. Disponível em: <https://www.fabbaloo.com/2020/03/are-corexy-3d-printers-taking-over>. Acesso em: 6 jan. 2022.

TAKAGAKI, Luiz Koiti. **Tecnologia de Impressão 3D**. Revista Inovação Tecnológica. São Paulo, v.2, n.2, p.28-40, jul/dez 2012. Acesso em: 10 jan. 2022.

UNIVERSIDADE TRISUL. **Impressora 3D na construção civil: conheça essa tecnologia e sua aplicabilidade**. Disponível em: <https://www.universidadetrisul.com.br/solucoes-construtivas/imprensa-3d-na-construcao-civil-conheca-essa-tecnologia-e-sua-aplicabilidade>. Acesso em: 10 jan. 2022.

ZAVELINSKI, Aron Letchacovski. **Projeto de Torno CNC para Prototipagem Rápida e Outros Usos**. 2017. Monografia (Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017. Acesso em: 10 jan. 2022.

ZAVELINSKI, Aron Letchacovski. **Projeto de Torno CNC para Prototipagem Rápida e Outros Usos**. 2017. Monografia (Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017. Acesso em: 15 jan. 2022.

ANEXO 1 – Linhas de códigos.

Linhas de código – 1. Alteração de código fonte para configuração dos passos por milímetro.

```
//=====
//===== Movement Settings =====
//=====
// @section motion

/**
 * Default Settings
 *
 * These settings can be reset by M502
 *
 * Note that if EEPROM is enabled, saved values will override these.
 */

/**
 * With this option each E stepper can have its own factors for the
 * following movement settings. If fewer factors are given than the
 * total number of extruders, the last value applies to the rest.
 */
#define DISTINCT_E_FACTORS

/**
 * Default Axis Steps Per Unit (steps/mm)
 * Override with M92
 *
 * X, Y, Z, E0 [, E1[, E2[, E3[, E4]]]]
 */
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 30.18, 30.30, 5.20, 500 }
```

Linhas de código – 2. Alteração de código fonte para definição de movimentação cartesiana.

```
//=====
//===== Mechanical Settings =====
//=====

// @section machine

// Uncomment one of these options to enable CoreXY, CoreXZ, or CoreYZ kinematics
// either in the usual order or reversed
#define COREXY
#define COREXZ
#define COREYZ
#define COREYX
```

```
##define COREZX
##define COREZY
```

Linhas de código – 3. Definições para os fins de curso.

```
=====
===== Endstop Settings =====
=====

// @section homing

// Specify here all the endstop connectors that are connected to any endstop or probe.
// Almost all printers will be using one per axis. Probes will use one or more of the
// extra connectors. Leave undefined any used for non-endstop and non-probe purposes.
#define USE_XMIN_PLUG
#define USE_YMIN_PLUG
#define USE_ZMIN_PLUG
##define USE_XMAX_PLUG
##define USE_YMAX_PLUG
##define USE_ZMAX_PLUG

// Enable pullup for all endstops to prevent a floating state
#define ENDSTOPPULLUPS
#if DISABLED(ENDSTOPPULLUPS)
    // Disable ENDSTOPPULLUPS to set pullups individually
    ##define ENDSTOPPULLUP_XMAX
    ##define ENDSTOPPULLUP_YMAX
    ##define ENDSTOPPULLUP_ZMAX
    ##define ENDSTOPPULLUP_XMIN
    ##define ENDSTOPPULLUP_YMIN
    ##define ENDSTOPPULLUP_ZMIN
    ##define ENDSTOPPULLUP_ZMIN_PROBE
#endif

// Mechanical endstop with COM to ground and NC to Signal uses "false" here (most
// common setup).
#define X_MIN_ENDSTOP_INVERTING true // set to true to invert the logic of the endstop.
#define Y_MIN_ENDSTOP_INVERTING true // set to true to invert the logic of the endstop.
#define Z_MIN_ENDSTOP_INVERTING true // set to true to invert the logic of the endstop.
#define X_MAX_ENDSTOP_INVERTING false // set to true to invert the logic of the endstop.
#define Y_MAX_ENDSTOP_INVERTING false // set to true to invert the logic of the endstop.
#define Z_MAX_ENDSTOP_INVERTING false // set to true to invert the logic of the endstop.
#define Z_MIN_PROBE_ENDSTOP_INVERTING false // set to true to invert the logic of the
// probe.
```

Linhas de código – 4. Configuração de parâmetros térmicos.

```
#define PREVENT_COLD_EXTRUSION
#define EXTRUDE_MINTEMP 0

/**
 * Prevent a single extrusion longer than EXTRUDE_MAXLENGTH.
 * Note: For Bowden Extruders make this large enough to allow load/unload.
 */
#define PREVENT_LENGTHY_EXTRUDE
#define EXTRUDE_MAXLENGTH 0

//=====
//===== Thermal Runaway Protection =====
//=====

/**
 * Thermal Protection provides additional protection to your printer from damage
 * and fire. Marlin always includes safe min and max temperature ranges which
 * protect against a broken or disconnected thermistor wire.
 *
 * The issue: If a thermistor falls out, it will report the much lower
 * temperature of the air in the room, and the the firmware will keep
 * the heater on.
 *
 * If you get "Thermal Runaway" or "Heating failed" errors the
 * details can be tuned in Configuration_adv.h
 */

//#define THERMAL_PROTECTION_HOTENDS // Enable thermal protection for all extruders
//#define THERMAL_PROTECTION_BED // Enable thermal protection for the heated bed
```

APÊNDICE 1 - Lista de materiais utilizados

Tabela de software utilizados.

Nº DO ITEM	Software
1	SolidWorks
2	CNC Simulator Pro
3	PROTEUS
4	Universal G Code Sender
5	Virtual Serial Ports Emulator
6	Arduino

Tabela de materiais eletrônicos.

Nº DO ITEM	PEÇA	QUANTIDADE
1	Fonte 12V 30A	1
2	RAMPS	1
3	Arduino Mega 2560	1
4	Driver 4988	4
5	Display Lcd 2004 20x04	1
6	Cartão SD	1
7	Push button	3
8	Motor de passo 23LM-K005-20	3
9	Motor de passo Pm551-048-hp69	1
10	Motor de passo eixo Z (sem referências)	1
11	Cabo de rede (4.5 m)	1
	Total	16

Tabela de materiais mecânicos.

Nº DO ITEM	PEÇA	QUANTIDADE
1	Perfil Estrutural em Alumínio - 20x40 - V-Slot	3
2	Perfil Estrutural em Alumínio - 20x40 - I	2
3	Parafuso Allen M5 x 20mm	8
4	Porca T M5	12
5	Contravento dos pés	4
6	Parafuso M5 x 10mm	17
7	Chapa de aço 2mm - 20x12 (mão francesa)	4
8	Porca M5	13
9	Suporte dos motores Y em perfil de alumínio - 10x05	1
10	Parafuso M3 x 07mm motor/suporte	8
11	Porca M3	12
12	Parafuso M3 x 05mm suporte/estrutura	4
13	Arruela M3	8
14	Porca T M3	8
15	Polia dentada GT2 53 dentes	2
16	Suporte do motor X em chapa de alumínio 5mm	1
17	Calço suporte polia em perfil de alumínio 20x40	2
18	Suporte da polia em perfil de alumínio 30x20	2
19	Parafuso M5 x 08mm suporte/estrutura	4
20	Bucha espaçadora em acrílico Ø0 8mm Ø1 15mm	2
21	Rolamento 625ZZ	6
22	Polia lisa Ø33,6 mm	3
23	Parafuso M8x48	8
24	Correia GT2 4m	2
25	Perfil quadrado 20x20 em alumínio - pés e haste Z	5
26	Perfil de esquadria em alumínio VT6009 - Contravento 2	4
27	Perfil de esquadria em alumínio VT1034 - Contravento 1	4
28	Engrenagem 35mm com 10 dentes	1
29	Polia bi- partida impressa em PLA com 30mm	8
30	Bucha espaçadora em nylon Ø0 8mm Ø1 10mm	4
31	Rolamento De Skate 8x Abec-9 22x7 X 8mm	8
32	Bucha espaçadora em acrílico Ø0 8mm Ø1 10mm	14
33	Engrenagem secundária com 58 dentes do motor Z	1
34	Carcaça metálica do motor	1
35	Eixo da engrenagem Ø04mm x 20mm	1

Nº DO ITEM	PEÇA	QUANTIDADE
36	Engrenagem fixa ao motor Z com 12 dentes	1
37	Parafuso 8x43 mm	13
38	Porca M8	24
39	Parafuso M8 x 20	2
40	Parafuso M8 x 40	22
41	Parafuso M8 x 20 usinado em 4mm	1
42	Cremalheira impressa em PLA com 10 x 15mm	18
43	Mangueira ¾ de polegada com 3 m	1
44	Suporte em acrílico para o rolete 70x50mm	2
45	Rolete em nylon Ø0 8mm x Ø1 30mm	10
46	Arruela 8mm	2
47	Fixador da correia em acrílico com 50x10mm	2
48	Base para impressão em madeira - 400 x 600	1
49	Abraçadeiras de nylon	3
50	Arame com bitola 1.24mm - 1.5m	1
51	Cantoneiras plásticas com 50x30mm - fins de curso	1
52	TOTAL	203