

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTOS ACADÊMICOS DE ELETRÔNICA E MECÂNICA  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MECATRÔNICA INDUSTRIAL

ANTONIO VERGUETZ SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM CABEÇOTE EXTRUSOR DE MASSAS  
CERÂMICAS PARA MANUFATURA ADITIVA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA  
2014

ANTONIO VERGUETZ SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM CABEÇOTE EXTRUSOR DE MASSAS  
CERÂMICAS PARA MANUFATURA ADITIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, dos Departamentos Acadêmicos de Eletrônica e Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo.

Orientador: Prof. Neri Volpato Ph.D.

Coorientador: Prof. Dr. José Aguiomar  
Foggiatto

CURITIBA  
2014

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

ANTONIO VERGUETZ SILVA

### **DESENVOLVIMENTO DE UM CABEÇOTE EXTRUSOR DE MASSAS CERÂMICAS PARA MANUFATURA ADITIVA**

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado no dia 04 de setembro de 2014, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Milton Luiz Polli  
Coordenador de Curso  
Departamento Acadêmico de Mecânica

---

Prof. Esp. Sérgio Moribe  
Responsável pela Atividade de Trabalho de Conclusão de Curso  
Departamento Acadêmico de Eletrônica

#### **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Me. David Kretschek  
UTFPR

---

Prof. Me. João Almeida de Góis  
UTFPR

---

Prof. Neri Volpato Ph.D.  
Orientador – UTFPR

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus orientadores Neri Volpato e José A. Foggiatto, pela compreensão, paciência e suporte durante a execução deste trabalho.

À Daphene M. Solis, pela inestimável ajuda e total apoio. Elementos que somados a sua beleza, tornaram-se fundamentais para conclusão deste trabalho. Agradeço também pela paciência ao ler e verificar os erros de ortografia e adequação as normas da UTFPR.

Ao meu amigo David Kretschek, pela ajuda com os desenhos.

À UTFPR e seus laboratórios, por ceder os recursos necessários para realização desta tarefa.

*“Se vi mais longe foi por estar sobre os ombros de gigantes.”*  
Isaac Newton

## RESUMO

VERGUETZ, Antonio. **DESENVOLVIMENTO DE UM CABEÇOTE EXTRUSOR DE MASSAS CERÂMICAS PARA MANUFATURA ADITIVA. 2014.** 129 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial), Departamentos Acadêmicos de Eletrônica e Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

O surgimento de uma série de processos de manufatura aditiva (AM – *additive manufacturing*) está sendo descrito como um marco no setor de fabricação, representando uma enorme economia de tempo, especialmente quando existe a necessidade de se produzir modelos com geometrias complexas. Vários materiais estão sendo empregados na AM, entre eles estão os poliméricos, metálicos e cerâmicos. Os materiais cerâmicos possuem muitas propriedades físicas e químicas capazes de atrair a atenção de pesquisadores que buscam novas aplicações industriais para este material, tais como componentes resistentes à alta temperatura e sensores piezoelétricos. Muitas vezes os cerâmicos exigem altos investimentos com maquinário e ferramentas, limitando seu emprego na produção de pequenos lotes. Além disso, componentes de cerâmica com formas complexas não podem ser fabricados por processos convencionais, tais como colagem e usinagem. O objetivo deste trabalho é desenvolver um cabeçote capaz de processar massas cerâmicas, gerando um filamento contínuo, que será utilizado para confeccionar peças cerâmicas pelo princípio da AM por extrusão e implementar este cabeçote em uma mesa de coordenadas XYZ. O resultado alcançado neste estudo apresentou um filamento contínuo durante a extrusão de toda a massa cerâmica presente no cilindro de alimentação do cabeçote. O cabeçote foi validado com a criação de uma peça de geometria simples, realizando o empilhamento de camadas.

**Palavras chave:** Manufatura Aditiva. Extrusão de Cerâmicos. FDMC.

## ABSTRACT

VERGUETZ, Antonio Silva. **Development of an extruder head of ceramic mass for additive manufacturing**. 2014. 129 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial), Departamentos Acadêmicos de Eletrônica e Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

The emergence of an additive manufacturing (AM) process series is being described as a mark in the fabrication sector, representing a huge time economy, especially when there is the need of produce models with complex geometries. Several materials are being employed on AM, among them are the polymers, metallics and ceramics (normally incorporated as powder/granulate or suspension/liquid). The ceramic materials have several chemistry and physics properties able to attract the attention of researchers that search new industrial applications to this material, including high temperature resistant components and piezoelectric sensors. The ceramics often requires heavy investments with machinery and tools, limiting their employment at small production lots. Moreover, ceramics components with complex forms cannot be fabricated by conventional process, such as slip casting and machining. The objective of this paper is develop a head able to process ceramic masses, generating a continuous filament, that will be utilized to confection ceramic parts by the additive manufacturing principle by extrusion and implement this head on a coordinated table XYZ. The achieved result on this study shows a continuous filament during the extrusion of all the ceramic mass present in the feed cylinder head. The head was validated with the creation of a simple geometry part, completing the stacking layers.

**Keywords:** Additive Manufacturing. Ceramic Extrusion. FDMC.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Uso tradicional da cerâmica .....                             | 17 |
| Figura 2 – Uso da cerâmica em engenharia.....                            | 17 |
| Figura 3 – Vazamento de liga metálica em molde cerâmico .....            | 19 |
| Figura 4 - Esquema de funcionamento da Estereolitografia.....            | 20 |
| Figura 5 - Esquema de funcionamento de IJP .....                         | 21 |
| Figura 6 - Representação do funcionamento de uma máquina FDM.....        | 23 |
| Figura 7 - Representação do funcionamento de uma máquina LOM.....        | 24 |
| Figura 8 - Processo de fabricação utilizando LSD e SLS.....              | 25 |
| Figura 9 - Arduino Due .....   | 27 |
| Figura 10 – Ambiente de programação .....                                | 27 |
| Figura 11 – Motor de passo de relutância variável.....                   | 29 |
| Figura 12 – Aspecto construtivo motor de passo a imã permanente.....     | 30 |
| Figura 13 – Motor de passo a imã permanente para 8 passos por volta..... | 31 |
| Figura 14 – Vista axial do motor de passo híbrido .....                  | 31 |
| Figura 15 – Vista radial do motor de passo híbrido .....                 | 32 |
| Figura 16 – Enrolamentos motor de passo unipolar.....                    | 33 |
| Figura 17 – Esquemático motor de passo unipolar .....                    | 34 |
| Figura 18 – Enrolamento motor de passo bipolar.....                      | 34 |
| Figura 19 – Esquemático motor de passo bipolar .....                     | 35 |
| Figura 20 - Representação de ondas na aplicação de micropasso.....       | 36 |
| Figura 21 - Interface gráfica do programa EMC <sup>2</sup> .....         | 37 |
| Figura 22 - Exemplo do uso de acoplamento .....                          | 38 |
| Figura 23 – Tipos de parafusos.....                                      | 39 |
| Figura 24 – Tarugo de teflon grafitado .....                             | 40 |
| Figura 25 – Mesa de coordenadas XYZ.....                                 | 42 |
| Figura 26 – Motor substituto eixo Z.....                                 | 44 |
| Figura 27 – Montagem do motor do eixo Z .....                            | 44 |
| Figura 28 – Configuração porta paralela no EMC <sup>2</sup> .....        | 44 |
| Figura 29 – Fluxograma de funcionamento da mesa de coordenadas.....      | 45 |
| Figura 30 – Concepção do cabeçote de extrusão .....                      | 48 |
| Figura 31 – Área da rosca transportadora.....                            | 50 |
| Figura 32 – Fixação do motor da rosca transportadora.....                | 51 |
| Figura 33 – Fixação do bico ao corpo do cabeçote.....                    | 51 |
| Figura 34 – Área do êmbolo .....   | 52 |
| Figura 35 – Fixação do cabo de aço ao êmbolo.....                        | 53 |
| Figura 36 – Cilindro de alimentação e canal do cabo de aço .....         | 54 |
| Figura 37 - Carretel .....   | 56 |
| Figura 38 – Espiral do carretel .....                                    | 56 |
| Figura 39 – Canal de alimentação.....                                    | 57 |
| Figura 40 – Posicionamento e fixação .....                               | 58 |
| Figura 41 – Bloco de RenShape 460 .....                                  | 59 |
| Figura 42 – Matéria-prima para fabricação do corpo do cabeçote .....     | 60 |
| Figura 43- Falhas ocorridas no material epóxi .....                      | 61 |
| Figura 44 – Tarugo de alumínio cedido pela UTFPR .....                   | 62 |
| Figura 45 – Cabo de aço.....   | 63 |
| Figura 46 – Anilhas p/ fixação do cabo de aço.....                       | 63 |
| Figura 47 – Broca de aço rápido de 10mm .....                            | 64 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 48 – Uso de mangueira como acoplamento.....                    | 65 |
| Figura 49 – Bloco de RenShape 5166 disponível no NUFER .....          | 66 |
| Figura 50 – Planejamento do processo de usinagem .....                | 66 |
| Figura 51 – Roland MDX 40 .....                                       | 67 |
| Figura 52 – Gabarito para posicionamento .....                        | 67 |
| Figura 53 – Motor com caixa de redução .....                          | 69 |
| Figura 54 – Motor sem caixa de redução .....                          | 69 |
| Figura 55 – Fonte chaveada.....                                       | 69 |
| Figura 56 – <i>Driver</i> de micropasso .....                         | 69 |
| Figura 57 – Arduino Uno .....   | 70 |
| Figura 58 – Massa cerâmica seca.....                                  | 72 |
| Figura 59 – Pulsos de acionamento dos motores de passo .....          | 74 |
| Figura 60 – Cabeçote completo .....                                   | 77 |
| Figura 61 – Filamentos interrompidos .....                            | 78 |
| Figura 62 – Filamento contínuo.....                                   | 79 |
| Figura 63 – Desgaste causado pelo atrito .....                        | 80 |
| Figura 64 – Exsudação durante processo .....                          | 81 |
| Figura 65 – Falhas causadas pela exsudação .....                      | 81 |
| Figura 66 – Flanges para adaptação dos motores .....                  | 82 |
| Figura 67 – Pá agitadora .....  | 83 |
| Figura 68 – Bucha e êmbolo fabricados em teflon grafitado .....       | 83 |
| Figura 69 – Junta de borracha .....                                   | 84 |
| Figura 70 – Cabeçote com melhorias implantadas .....                  | 84 |
| Figura 71 – Teste de continuidade do filamento.....                   | 86 |
| Figura 72 – Teste de deposição .....                                  | 86 |
| Figura 73 - Peça verde.....   | 87 |
| Figura 74 – Peça após queima.....                                     | 87 |
| Figura 75 – Amostras de peças cerâmica produzidas pelo cabeçote ..... | 88 |
| Figura 76 – Mufla Thermolab .....                                     | 88 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Propriedades mecânicas do RenShape .....                | 41 |
| Tabela 2 - Requisitos básicos da estrutura do cabeçote .....       | 49 |
| Tabela 3 – Ajuste de corrente dos motores de passo .....           | 73 |
| Tabela 4 – Ajuste da resolução do driver .....                     | 73 |
| Tabela 5 - Detalhamento do movimento do êmbolo .....               | 76 |
| Tabela 6 – Misturas cerâmicas.....                                 | 77 |
| Tabela 7 - Detalhamento do movimento do êmbolo após alterado ..... | 85 |
| Tabela 8- Análise dimensional das amostras obtidas .....           | 89 |

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

|                  |  |
|------------------|--|
| AM               | Manufatura Aditiva ( <i>Addictive Manufacturing</i> )                                |
| CAD              | Projeto Auxiliado por Computador ( <i>Computer Aided Design</i> )                    |
| CAM              | Manufatura Auxiliada por Computador ( <i>Computer Aided Manufacturing</i> )          |
| CLPL             | <i>Cold Low Pressure Lamination</i>  |
| CN               | Comando Numérico   |
| CNC              | Comando Numérico Computadorizado   |
| DCIJP            | Impressão Cerâmica Direta a Jato de Tinta ( <i>Direct Ceramic Ink-Jet Printing</i> ) |
| EMC <sup>2</sup> | <i>Enhanced Machine Controller Project</i>   |
| FDMC             | Modelagem por Fusão e Deposição de Cerâmicos   |
| IJP              | Impressão a Jato de Tinta  |
| LITS             | Laboratório de Inovação em Tecnologia e Sensores                                     |
| LOM              | Fabricação de Objeto Laminado  |
| LSD              | <i>Layer-wise Slurry Deposition</i>  |
| LTCC             | <i>Low Temperature Co-fired Ceramic</i>  |
| NUFER            | Núcleo de Prototipagem e Ferramental   |
| PTFE             | Politetrafluoretileno  |
| PWM              | <i>Pulse Width Modulation</i>  |
| SL               | Estereolitografia  |
| SLS              | Sinterização Seletiva a Laser  |
| UFPR             | Universidade Federal do Paraná   |
| UTFPR            | Universidade Tecnológica Federal do Paraná   |
| UV               | Ultravioleta   |

## SUMÁRIO

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>   | <b>12</b>  |
| 1.1      | TEMA  | 12         |
| 1.2      | DELIMITAÇÃO DO ESTUDO   | 13         |
| 1.3      | PROBLEMA  | 13         |
| 1.4      | OBJETIVOS   | 14         |
| 1.4.1    | Objetivo Geral  | 14         |
| 1.4.2    | Objetivos específicos   | 14         |
| 1.5      | JUSTIFICATIVA   | 15         |
| 1.6      | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO                                       | 16         |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                                  | <b>17</b>  |
| 2.1      | CERÂMICOS   | 17         |
| 2.2      | MANUFATURA ADITIVA  | 19         |
| 2.2.1    | Estereolitografia de massa cerâmica                           | 20         |
| 2.2.2    | Direct Ceramic Ink-Jet Printing (DCIJP)                       | 21         |
| 2.2.3    | Modelagem por Fusão e Deposição de Cerâmicos (FDMC)           | 22         |
| 2.2.4    | Fabricação de Objeto Laminado (LOM) para cerâmicos            | 24         |
| 2.2.5    | Direct Laser Sintering and Layer-Wise Slurry Deposition (LSD) | 25         |
| 2.3      | COMPONENTES, PROGRAMAS E MATERIAIS UTILIZADOS                 | 26         |
| 2.3.1    | Arduino   | 26         |
| 2.3.2    | Motor de passo  | 28         |
| 2.3.3    | Programação CNC   | 36         |
| 2.3.4    | Programa EMC <sup>2</sup>                                     | 37         |
| 2.3.5    | Acoplamentos e parafusos                                      | 38         |
| 2.3.6    | PTFE – “TEFLON”   | 39         |
| 2.3.7    | RENSHAPE  | 40         |
| <b>3</b> | <b>MESA DE COORDENADAS XYZ</b>                                | <b>42</b>  |
| <b>4</b> | <b>DESENVOLVIMENTO DO CABEÇOTE DE EXTRUSÃO</b>                | <b>46</b>  |
| 4.1      | ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DO CABEÇOTE            | 46         |
| 4.1.1    | Estudo dos princípios de deposição de materiais cerâmicos     | 47         |
| 4.1.2    | Criação de uma concepção de deposição de material cerâmico    | 48         |
| 4.1.3    | Projeto estrutural do cabeçote                                | 48         |
| 4.1.4    | Escolha da matéria-prima dos itens a ser fabricados           | 58         |
| 4.1.5    | Planejamento de processo, fabricação e montagem               | 66         |
| 4.1.6    | Escolha e ajuste dos componentes padrão                       | 68         |
| 4.1.7    | Integração do controle do cabeçote com o código G             | 70         |
| 4.1.8    | Definição da massa cerâmica a ser processada                  | 71         |
| 4.1.9    | Controle do cabeçote  | 72         |
| 4.2      | TESTES DE EXTRUSÃO  | 76         |
| 4.3      | MELHORIAS PROPOSTAS   | 81         |
| 4.4      | IMPLEMENTAÇÃO DAS MELHORIAS                                   | 82         |
| <b>5</b> | <b>VALIDAÇÃO DO CABEÇOTE E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>         | <b>86</b>  |
| <b>6</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>                                   | <b>90</b>  |
| 6.1      | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS                              | 91         |
| <b>7</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                             | <b>92</b>  |
|          | <b>APÊNDICE A</b>   | <b>99</b>  |
|          | <b>APÊNDICE B</b>   | <b>110</b> |
|          | <b>APÊNDICE C</b>   | <b>112</b> |
|          | <b>APÊNDICE D</b>   | <b>114</b> |

|                      |            |
|----------------------|------------|
| <b>ANEXO A</b> ..... | <b>115</b> |
| <b>ANEXO B</b> ..... | <b>116</b> |
| <b>ANEXO C</b> ..... | <b>124</b> |
| <b>ANEXO D</b> ..... | <b>129</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 TEMA

A manufatura aditiva (AM – *additive manufacturing*) representa uma classe de processo de fabricação definida pela ASTM F2792–12a (*Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*) como processo de união de materiais para confecção de objetos gerados a partir de um modelo 3D virtual, usualmente camada sobre camada, oposto às técnicas tradicionais de fabricação, em que se tem remoção de material (ASTM, 2012).

Segundo Barna *et al.* (2010), o surgimento de uma série de processos de AM está sendo descrito como um marco no setor de fabricação, representando uma enorme economia de tempo, especialmente quando existe a necessidade de se produzir modelos com geometrias complexas. Algumas geometrias que requeriam meses para serem fabricadas nos anos 70, agora possuem mais de três vezes o nível de complexidade, podendo ser fabricadas em algumas semanas. Desde 1988 surgiram mais de vinte diferentes tecnologias de AM. Os primeiros processos de AM tornaram-se disponíveis no final de 1980 e começaram a ser utilizadas para construção de modelos visuais e protótipos funcionais. Hoje em dia, a AM é utilizada para uma vasta gama de aplicações, sendo aplicado até como alternativa para produção em pequena escala.

De acordo com a literatura, vários materiais estão sendo empregados na AM, entre eles estão os poliméricos, metálicos e cerâmicos. Os cerâmicos geralmente são incorporados como pó/granulado e/ou suspensão/líquido (JACOBS, 1992; GRIFFITH; HALLORAN, 1996).

Além de reduzir o tempo de desenvolvimento do produto até seu lançamento, a aplicação da AM promove o aumento da qualidade do produto final e a redução de falhas de processo. Comparada a outros processos de fabricação a AM apresenta maior facilidade de automatização, baixa intervenção do operador, possibilidade de análise de forma e funcionalidade na fase anterior a produção de ferramental definitivo, entre outros. As vantagens mencionadas acima, entre outras, tornam a AM

cada vez mais popular entre as empresas que buscam sucesso comercial (CARVALHO; VOLPATO, 2007).

Considerando as vantagens mencionadas e considerando também que não existe tecnologia nacional de AM que utilize materiais cerâmicos como matéria-prima para construção de protótipos, pretende-se desenvolver um cabeçote capaz de realizar o processamento do material cerâmico e acoplá-lo à uma mesa de coordenadas XYZ, obtendo uma máquina de AM de cerâmicos.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Este trabalho objetiva focar tão somente eventos diretamente relacionados a extrusão de massas cerâmicas. Dando prioridade a se trabalhar com o que há disponível na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), evitando comprar componentes, a fim de se diminuir o orçamento do projeto, e utilizando a infraestrutura já utilizada por outros projetos em andamento. Não está no escopo deste trabalho entrar em características, testes ou soluções inerentes ao pós-processamento das peças fabricadas pelo cabeçote, pois as massas cerâmicas se comportam de forma diferente umas das outras. Estudos específicos devem ser abordados em trabalhos futuros.

## 1.3 PROBLEMA

A aplicação de AM em cerâmicos foi motivada pelos avanços da engenharia cerâmica e da cerâmica tradicional, em que os métodos de criação de formas complexas são limitados (CAWLEY, 1997). Os cerâmicos possuem muitas propriedades físicas e químicas capazes de atrair a atenção de pesquisadores que buscam novas aplicações industriais para este material, tais como componentes resistentes à alta temperatura, sensores piezoelétricos e atuadores (SAFARI *et al.*, 2006). Mas materiais cerâmicos muitas vezes exigem altos investimentos com maquinário para produção em pequenas quantidades e elevados custos com

ferramentas de moldagem por injeção em grandes lotes. Além disso, componentes cerâmicos com formas complexas muitas vezes não podem ser fabricados por processos convencionais, tais como colagem e usinagem. Mesmo peças com geometrias simples, que podem ser produzidas pelo método tradicional de fabricação, têm o tempo entre o desenho da peça e a verificação do primeiro protótipo demasiadamente grande. Várias aplicações industriais de materiais cerâmicos são restringidas pela falta de capacidade para se trabalhar com fabricação de peças com geometrias complexas.

Nesse sentido, pode-se afirmar que existe a necessidade de se desenvolver um meio capaz de facilitar e baratear a fabricação de peças cerâmicas com geometrias complexas e em pequena quantidade no Brasil.

## 1.4 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho, relativos ao problema anteriormente apresentado.

### 1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolver um cabeçote capaz de processar massas cerâmicas, gerando um filamento contínuo, que será utilizado para confeccionar peças cerâmicas pelo princípio da manufatura aditiva por extrusão e implementá-lo a uma mesa de coordenadas XYZ.

### 1.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho contemplam:

- Caracterizar o sistema de acionamento e controle da mesa de coordenadas XYZ já existente;

- Construir um sistema capaz de extrudar massas cerâmicas;
- Desenvolver um sistema de controle da velocidade de extrusão;
- Implementar o sistema de controle do cabeçote no programa EMC<sup>2</sup> responsável pelo controle do Comando Numérico Computadorizado (CNC) da mesa XYZ;
- Validar o cabeçote realizando testes de deposição de material cerâmico.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

No Brasil, a utilização da AM ainda é inicial e está mais concentrada em produção de modelos para a engenharia mecânica, desenho industrial e paleontologia, além de contramoldes para fundição de próteses utilizadas em cirurgias de reconstrução bucomaxilofacial e cranial (CELANI; BERTHO, 2007).

Segundo Rosochowski e Matuszak (2000), a contínua necessidade de redução do tempo de desenvolvimento de produto (*time to market*) tem aumentado de maneira acentuada a demanda para a construção de protótipos físicos de maneira rápida. Tal fato, associado à crescente complexidade das peças, vem tornando indispensável o uso de técnicas de AM para encurtar o tempo de desenvolvimento do produto, descobrir falhas, e melhorar sua qualidade final.

Dentre os vários fatores que impulsionam a utilização desta tecnologia em âmbito nacional está o tamanho do mercado formado por um grande número de montadoras e suas empresas de base, expansão de escritórios de design e de desenvolvimento de produto, entre outros (PETRUSCH *et al.*, 2007). Ainda que o cenário nacional pareça otimista em relação às tecnologias de AM, fatores como custo de aquisição, instalação, manutenção e matéria-prima limitam o crescimento e iniciativas significativas no setor. Nesse sentido, o desenvolvimento de uma tecnologia nacional seria capaz de tornar o mercado brasileiro mais competitivo frente aos concorrentes internacionais, expandir o número de empresas com acesso à tecnologia AM, otimizar projetos e processos produtivos.

Beltrão (1991), construiu uma máquina “Furadeira de Coordenadas com Comando Numérico para Placas de Circuito Impresso”, esta máquina encontra-se no

Núcleo de Prototipagem e Ferramental (NUFER) da UTFPR, mas no momento está inoperante. Esta máquina foi adaptada e utilizada em outros trabalhos de diplomação e mestrado, servindo como uma mesa de coordenadas XYZ. Este projeto pretende adaptá-la para ser utilizada em mais um processo, neste caso para operar como uma máquina de AM de cerâmicos.

A realização deste projeto abrirá um leque de possibilidades de estudos sobre AM, além de desenvolver algo ainda inédito no país, ou seja, uma tecnologia de AM brasileira capaz de fabricar protótipos cerâmicos.

## 1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este documento é dividido em seis capítulos.

**Capítulo 1 - Introdução:** se refere à introdução à área do conhecimento e contexto do trabalho. São apresentados os problemas inerentes da AM relacionada com cerâmicos, exposta a justificativa para buscar solucioná-los e os objetivos a serem alcançados para sua execução.

**Capítulo 2 – Revisão bibliográfica:** revisa o conhecimento de AM baseado em processamento de materiais cerâmicos e aborda os conceitos dos componentes mecânicos e eletrônicos utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

**Capítulo 3 – Mesa de coordenadas XYZ:** aborda o estado, problemas e os procedimentos para manutenção de um mecanismo já existente que será utilizado no decorrer do projeto.

**Capítulo 4 – Desenvolvimento do cabeçote de extrusão:** é descrito o desenvolvimento do cabeçote extrusor para processamento de massas cerâmicas.

**Capítulo 5 – Validação do cabeçote e análise dos resultados:** apresenta os resultados e discussões dos experimentos realizados com o cabeçote extrusor.

**Capítulo 6 – Considerações finais:** são descritas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.



Várias técnicas foram desenvolvidas para processar as massas cerâmicas com a pretensão de obter peças, entre elas estão a colagem, a extrusão e conformação, sendo a última a mais utilizada devido a sua elevada produtividade, facilidade de automação e capacidade de produzir peças de tamanhos e formas variadas, sem contração de secagem e com baixa tolerância dimensional (ALBARO, 2000).

Após obtida a geometria desejada ocorre uma importante etapa do processamento cerâmico, a secagem, em que se obtém a chamada “peça verde”. Em termos de tecnologia cerâmica, a secagem é a remoção do líquido, geralmente água (que acontece por evaporação), que faz com que o corpo adquira resistência mecânica para queima. Trata-se de uma etapa decisiva, na qual a retração volumétrica que ocorre simultaneamente à perda de água requer vários cuidados para evitar trincas e contrações irreversíveis na peça moldada. (SOUSA *et al.*, 2004).

Tendo o corpo cerâmico seco, é realizada a sinterização. Consiste em um processo natural em que um conjunto de partículas em contato mútuo, sob a ação da temperatura, transforma-se em um corpo íntegro e de maior resistência mecânica, podendo, inclusive, tornar-se totalmente denso (SILVA, 2008). Sendo seu principal objetivo a consolidação do formato definitivo e a obtenção das propriedades finais dos corpos cerâmicos (SOUZA, 2008). Nesta etapa ocorre a transmissão de calor das peças, criando assim condições para que ocorram transformações físicas e químicas que levam às propriedades finais desejadas, como: perda de massa, formação de fase vítrea, desenvolvimento de fase cristalina e outras (SILVA, 2008). A sinterização realizada com parâmetros incorretos pode causar trincas e perdas dimensionais na peça.

A Figura 3 exemplifica o uso de material cerâmico como ferramenta para processamento de metais.



**Figura 3 – Vazamento de liga metálica em molde cerâmico**  
**Fonte: Alves, 2000.**

## **2.2 MANUFATURA ADITIVA**

Manufatura Aditiva (AM) é “[...] um processo de fabricação através da adição de material em forma de camadas planas sucessivas. [...] Esta tecnologia permite fabricar componentes (protótipos, modelos, etc.) físicos em 3 dimensões (3D), com informações obtidas diretamente do modelo geométrico gerado no sistema CAD, de forma rápida, automatizada e totalmente flexível.” (VOLPATO; CARVALHO, 2007).

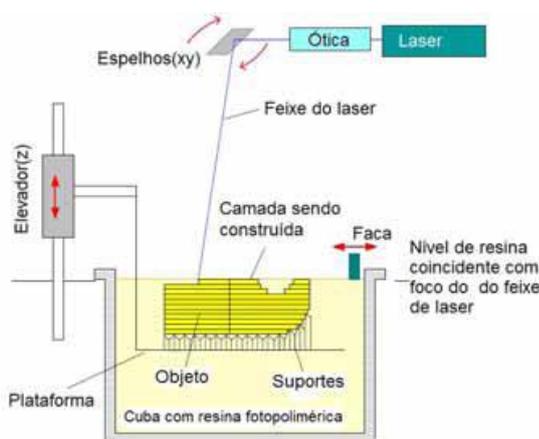
Segundo Volpato e Carvalho (2007), “o processo inicia com o modelo 3D da peça CAD sendo “fatiado” eletronicamente, obtendo-se curvas de níveis 2D que definirão, em cada camada, onde existe ou não material a ser adicionado. Estas camadas serão então processadas sequencialmente, gerando-se a peça física através do empilhamento e aderência das mesmas, iniciando na base e indo até o topo da mesma.”

A seguir são apresentadas algumas tecnologias de AM já desenvolvidas que trabalham com materiais cerâmicos.

### 2.2.1 Estereolitografia de massa cerâmica

A fotopolimerização é a base da estereolitografia (SL), que é uma técnica de AM muito popular e precisa. As máquinas comerciais que funcionam com este princípio produzem peças a partir da polimerização de resinas através da exposição do monômero líquido a um laser que trabalha na faixa de luz ultravioleta (UV).

Para fabricar peças cerâmicas por este processo, o monômero líquido é substituído por uma resina composta por uma suspensão de pó de cerâmico e resina foto sensível, demonstrado pela primeira vez por Griffith e Halloran (1996). Como mostrado na Figura 4, o primeiro passo é a cura de uma fina camada (150 ~ 200  $\mu\text{m}$ ), executada pela varredura de um laser UV sobre a superfície da resina. Após a cura da camada, a plataforma de trabalho mergulha na suspensão permitindo que a resina líquida cubra a porção curada da peça. Uma lâmina uniformiza a superfície, deixando-a pronta para ser curada e originar uma nova camada. Este processo é repetido até se obter a peça cerâmica verde acabada. Posteriormente, a peça verde é levada ao forno onde acontece a sinterização e se obtém a peça cerâmica desejada. Os lasers utilizados neste processo são de gás hélio-cádmio, laser de gás de argônio e mais recentemente, lasers de estado sólido de Nd-YVO4.



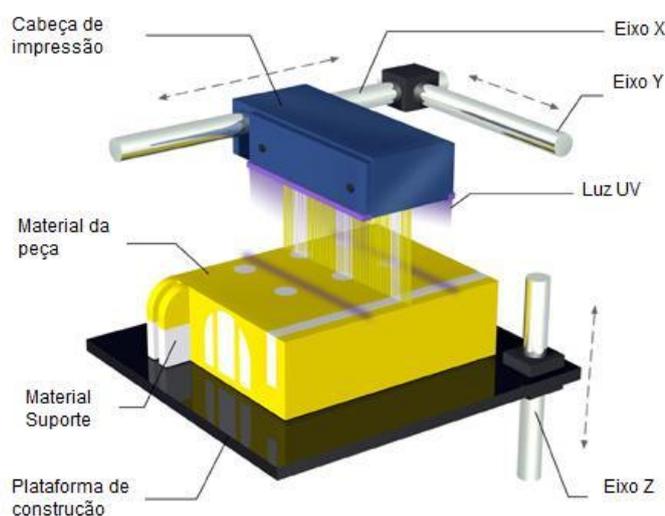
**Figura 4 - Esquema de funcionamento da Estereolitografia**  
**Fonte: Vandresen, 2004.**

Chartier *et al.* (2002) e Hinczewski *et al.* (1998), investigaram a suspensão cerâmica apropriada para o processo de SL. A fim de alcançar uma densidade verde suficientemente alta, a fração de volume sólido, deve estar no intervalo de 50 a 65%.

Por outro lado, é necessário que a suspensão tenha uma baixa viscosidade para que aconteça o cobrimento da camada curada. A alumina e sílica em pó têm sido utilizados para preparar a suspensão cerâmica (GRIFFITH & HALLORAN, 1996; CHARTIER *et al.*, 2002; HINCZEWSKI *et al.*, 1998; TAY *et al.*, 2003). Os resultados alcançados foram de amostras com resistência mecânica similar a outras amostras obtidas por prensagem uniaxial.

### 2.2.2 Direct Ceramic Ink-Jet Printing (DCIJP)

Entre os processos de AM existe o processo de impressão por jateamento de material (tipo jato de tinta - IJP), que se baseia em matéria-prima líquida e consiste na deposição de pequenas gotas de material sobre uma bandeja e, simultaneamente, na cura da camada de material por uma lâmpada UV. A bandeja é então deslocada para baixo, e o processo continua da mesma forma (VOLPATO; CARVALHO, 2007).



**Figura 5 - Esquema de funcionamento de IJP**  
Fonte: Objet, 2013.

Assim como no processo IJP observado na Figura 5, a técnica *Direct Ceramic Ink-Jet Printing* (DCIJP) também faz uso de um cabeçote a jato de tinta para criar peças a partir do empilhamento de camadas sucessivas. A matéria-prima utilizada é uma suspensão coloidal dispersa com pó de cerâmico. Este processo tem potencial

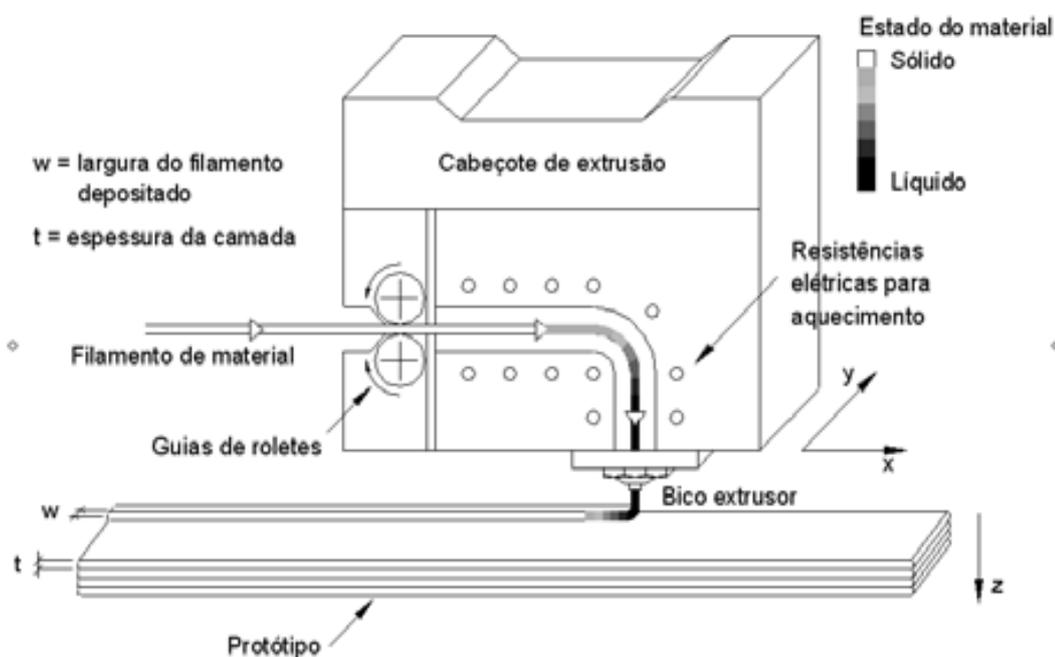
para produzir uma ampla gama de contornos cerâmicos finos com alta resolução que permite componentes miniaturizados serem fabricados. Com a utilização de cabeças de impressão específicas, gradientes funcionais e multicomponentes de materiais podem ser fabricados por este método.

Ajustando a abertura da cabeça de impressão e controlando o fenômeno de espalhamento da gotícula, podem-se alcançar camadas de 50µm de espessura, podendo atingir 10µm, levando em conta a rápida evolução no campo de impressão (CAPPI *et al.*, 2008; LEJEUNE *et al.*, 2009).

### 2.2.3 Modelagem por Fusão e Deposição de Cerâmicos (FDMC)

A Modelagem por Fusão e Deposição de Cerâmicos (FDMC) foi desenvolvida primeiramente por Ahmad Safari (BANDYOPADHYAY *et al.*, 1997; LOUS *et al.*, 2000). A matéria-prima para este processo é composta por um pó cerâmico com carga de 50 à 55vol. % de um composto aglutinante termoplástico que contém: elastômeros, cera, surfactante e agentes plastificantes. Um filamento com um diâmetro de aproximadamente 1,8 milímetros é aquecido (140 – 200°C) e atua como um êmbolo realizando a extrusão do material através de um bico com um furo com diâmetro entre 0,254 e 1,5 mm, gerando assim o filamento a ser utilizado para AM (Figura 6).

A aderência entre os filamentos adjacentes e as camadas anteriores ocorre devido a colagem do material fundido a superfície do material já depositado. As peças 3D são fabricadas camada-a-camada e posteriormente a peça verde é removida da mesa de deposição e levada ao forno para receber tratamento térmico e remoção dos aditivos orgânicos.



**Figura 6 - Representação do funcionamento de uma máquina FDM**  
 Fonte: AHN, 2002.

Outro processo de AM que utiliza o método de extrusão e deposição foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisa Avançada de Tucson (EUA) (LOMBARDI & CALVERT, 1999; VAIDYANATHAN *et al.*, 2000). Neste processo, um cabeçote de extrusão de alta pressão é utilizado. Esta tecnologia permite o emprego de diferentes materiais cerâmicos com aglutinantes à base de cera.

Processos de fabricação de peças de nitreto de silício por extrusão de materiais com carga cerâmica de 55vol% também foram testados. Neste estudo uma suspensão termoplástica com 55vol % de zircônia em um veículo à base de cera foram extrudados através de uma série de bicos finos, com diâmetros variando entre 76 e 510  $\mu\text{m}$  (GRIDAL & EVANS, 2003). Os resultados mostram que a utilização de suspensões termoplásticas não é ideal para bicos com furos de pequenos diâmetros ( $< 100\mu\text{m}$ ), pois o filamento se solidifica antes mesmo de ser depositado e aderir aos filamentos e camadas adjacentes. Isso significa que o uso de materiais de mudança sólido-líquido em técnicas de extrusão é limitado para micro fabricação.

Outro estudo prevê a construção de peças a partir da extrusão de materiais à base de solvente. Este princípio usa a transição da cera do estado líquido para o sólido pela evaporação do solvente presente na suspensão cerâmica (LU *et al.*, 2010).

## 2.2.4 Fabricação de Objeto Laminado (LOM) para cerâmicos

Fabricação de Objeto Laminado (LOM) gera componentes tridimensionais por adição de camadas a partir de material em lâminas. As peças são construídas a partir da laminação e modelagem de papéis pré-cerâmicos ou fita cerâmica verde, conforme pode ser observado na Figura 7. Pode ser considerado como um processo híbrido entre processos de adição e remoção de material. Cada camada é cortada individualmente por uma faca ou por um feixe de laser, de acordo com a seção transversal da peça definida pelo modelo CAD. As camadas são coladas às camadas anteriores por meio de um adesivo termoplástico localizado sob a folha, este adesivo é ativado por meio de calor e pressão durante o processamento. Papéis pré-cerâmicos de  $Al_2O_3$  e SiC tem sido desenvolvido para o processo de LOM (TRAVITZKY *et al.*, 2008).

Fitas cerâmicas verdes comerciais nominadas de *Low Temperature Co-fired Ceramic* (LTCC) também foram utilizados para fabricar componentes cerâmicos complexos pelo processo *Cold Low Pressure Lamination* (CLPL) (SCHINDLER & ROOSEN, 2009). Pesquisas sobre o uso de um processo de LOM “não planar” foi realizado a fim de construir peças com camadas curvas, podendo assim vencer as limitações do processo com camadas planas (KLOSTERMAN *et al.*, 1999).

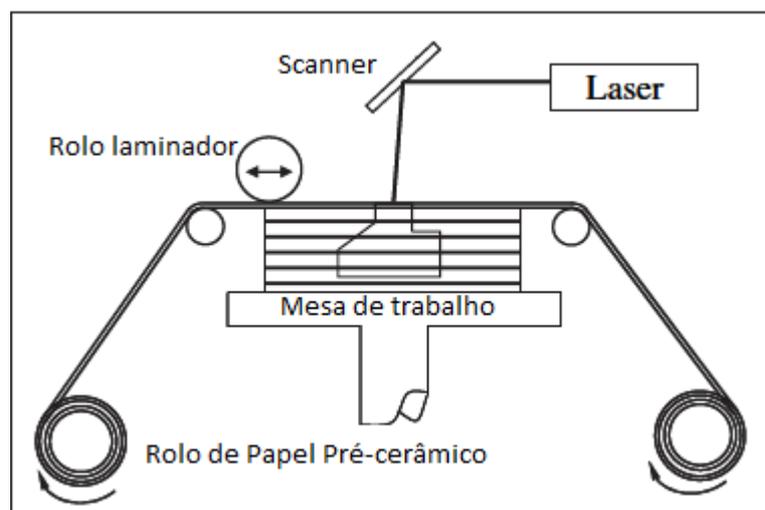
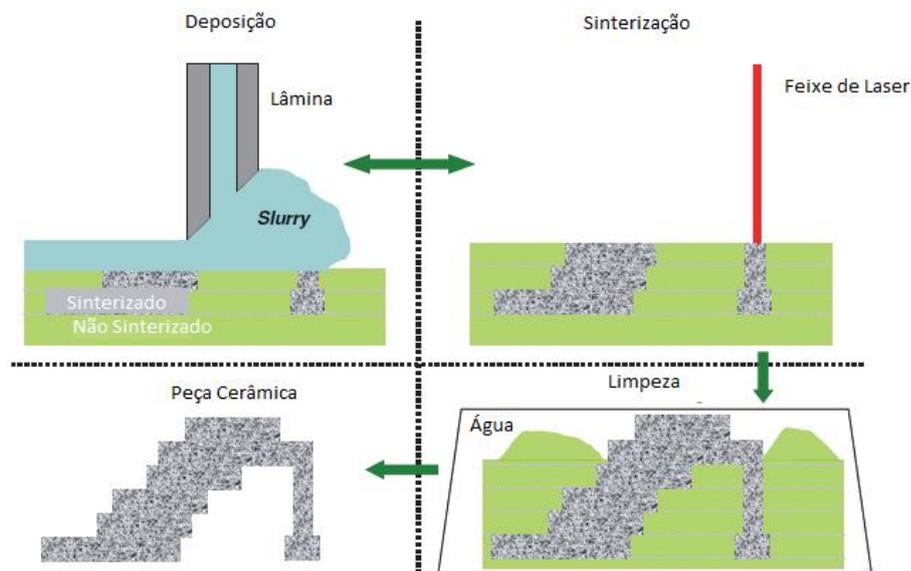


Figura 7 - Representação do funcionamento de uma máquina LOM  
Fonte: Adaptado de Travitzky *et al.*, 2008.

### 2.2.5 Direct Laser Sintering and Layer-Wise Slurry Deposition (LSD)

O *Layer-wise slurry deposition* (LSD) é um processo de AM por sinterização seletiva a laser (SLS), mas ao invés de se utilizar pós cerâmicos, ou polímero-cerâmicos, a matéria prima é uma massa cerâmica. O processo LSD tem sido utilizado para gerar uma camada cerâmica densa que permite que a camada seja sinterizada (SADEGHIAN *et al.*, 2004; GUENSTER *et al.*, 2003; GAHLER *et al.*, 2006; HEINRICH *et al.*, 2007; KRAUSE *et al.*, 2004; TIAN *et al.*, 2009). A massa empregada neste processo é uma suspensão aquosa de cerâmica com menos de 2% de aditivo orgânico. As camadas podem ser obtidas pela evaporação da água das camadas de pasta cerâmica depositadas. Estas camadas têm uma microestrutura densa e maior densidade a verde do que o pó utilizado nos processos convencionais de SLS. Isto significa que a capacidade de sinterização é maior, o que produzirá uma peça cerâmica mais densa do que a produzida a partir de pó cerâmico.

O princípio do LSD é baseado no processo de sinterização direta a laser, e é ilustrado na Figura 8.



**Figura 8 - Processo de fabricação utilizando LSD e SLS.**  
**Fonte: Adaptado de Gahler *et al.*, 2006.**

A pasta cerâmica é depositada em uma mesa cerâmica pré-aquecida e uniformizada através de uma lâmina. Depois de seca, a camada cerâmica formada é

sinterizada por um feixe de laser controlado pelo computador, atingindo as áreas de acordo com o padrão das seções transversais do modelo CAD. Este processo é repetido até que todas as camadas sejam sinterizadas. Posteriormente a área não sinterizada é removida com água. Então se tem a peça cerâmica acabada.

## 2.3 COMPONENTES, PROGRAMAS E MATERIAIS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foi necessário compreender os fundamentos de funcionamento e características dos componentes, programas e materiais que utilizados. Elementos que serão apresentados no decorrer deste capítulo.

### 2.3.1 Arduino

O Arduino é uma plataforma criada para suprir a demanda do indivíduo entusiasta de eletrônica que deseja usar e programar microcontroladores de forma fácil e barata. Esta plataforma, que foi gerada com *hardware* e *software* livres, consiste em uma placa com circuitos de entrada/saída para um microcontrolador AVR, ambiente de desenvolvimento e *bootloader*. O *bootloader* já vem gravado no microcontrolador e pode ser facilmente gravado caso o indivíduo pretenda construir seu próprio Arduino através dos esquemas elétricos disponíveis na internet (WERNECK, 2009).

A placa é fornecida comercialmente com o nome “Arduino” através do fabricante original e com outros nomes por vários outros fabricantes diferentes, podendo ser adquirida em várias versões. A Figura 9 traz a placa Arduino Due uma das mais modernas e potentes encontradas no mercado.

Todas as versões possuem microcontroladores que utilizam comunicação serial e as versões mais recentes possuem embutido ao circuito um conversor USB-serial que permite conexão direta com a porta USB do computador. Entre outras

variações da placa original, há uma versão com Bluetooth que permite acesso sem fio.

Outra placa comumente encontrada é a Arduino Uno que possui 13 pinos de entrada/saída, podendo ser configurada conforme desejado para leitura de circuitos ou acionamento de atuadores. Além desses pinos a placa ainda possui 6 pinos de entradas analógicas para leitura de sensores e sinais de entrada de diversos tipos. Dentre os 13 pinos de entrada/ saída, 6 podem ser configurados para usar *Pulse Width Modulation* (PWM) que permite a interação fácil com dispositivos que utilizam essa forma de modulação, como servo motores, assim como o controle da intensidade do sinal entregue pela saída.

O Ambiente de programação do Arduino é uma aplicação multiplataforma, desenvolvida em JAVA, com código fonte aberto, que funciona em Windows, Linux e Mac. Este ambiente tem o visual de um editor simples, facilitando a usabilidade, sendo prático de editar, compilar e gravar o código no microcontrolador. A linguagem usada é baseada em C e algumas construções de C++. Existem milhares de bibliotecas feitas por usuários do mundo todo que podem facilitar a tarefa de programação, sendo assim existe muita coisa pronta que pode ser incluída no código de forma a agilizar o trabalho. Na Figura 10 é possível verificar o ambiente de desenvolvimento.



Figura 9 - Arduino Due

Fonte: <http://blog.filipeflop.com/arduino>

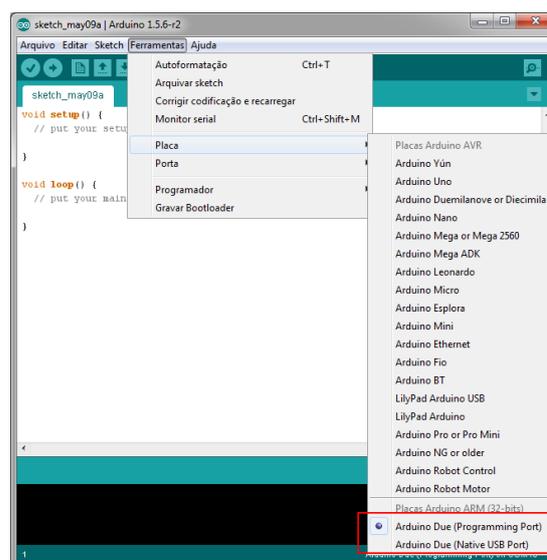


Figura 10 – Ambiente de programação

Fonte: <http://blog.filipeflop.com/arduino>

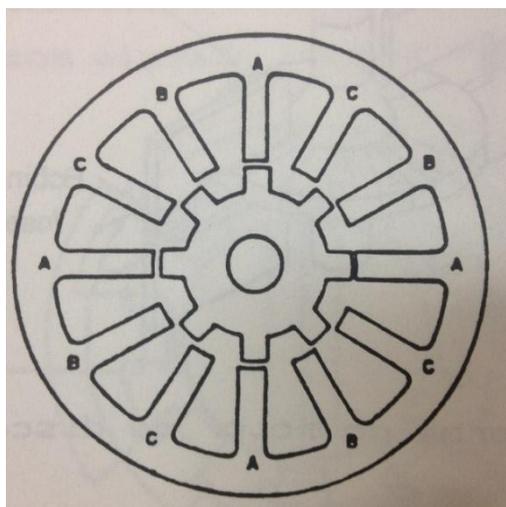
### 2.3.2 Motor de passo

O motor de passo é um transdutor que converte pulsos elétricos em energia cinética. As frações de uma revolução completa em torno de seu eixo são definidas como “passos”. O ângulo correspondente ao incremento destes passos é chamado de resolução, que é determinado pelas características construtivas do motor (JONES, 1998).

O movimento produzido por um pulso é preciso e repetível, por esse motivo estes motores são muito eficazes em aplicações em que o posicionamento é importante (PETRUZELLA, 2013).

Existem cinco tipos básicos de motores de passo, são eles: o motor de passo a relutância variável, a ímã permanente, tipo híbrido, tipo solenóide e eletro-hidráulico. Sendo os três primeiros os mais comumente encontrados. O modelo tipo solenóide tem emprego principalmente na indústria de relógios. O modelo eletro-hidráulico é constituído de um motor elétrico de baixa potência acoplado a um amplificador hidráulico de elevada potência mecânica (BASSO, 1994).

O primeiro tipo, de relutância variável, é caracterizado pela falta de rotor permanentemente magnetizado, possui rotor (estrutura móvel) e estator (estrutura fixa) constituídos por material ferromagnético com determinado número de ranhuras (dentes). A Figura 11 apresenta o aspecto construtivo do motor, observa-se a existência de 12 dentes no estator e 8 no rotor. Os polos salientes do estator contém enrolamentos trifásicos identificados pelas letras A, B e C. O princípio de funcionamento do motor baseia-se na transferência de energia produzida entre o sistema elétrico do estator e o circuito mecânico do rotor, quando a energia do campo magnético de acoplamento pode ser influenciada pela configuração dos componentes mecânicos (FITZGERALD *et al.*, 1975)



**Figura 11 – Motor de passo de relutância variável**  
**Fonte: Basso, 1994.**

De acordo com a Figura 11, com a alimentação na fase A, o rotor será deslocado para a posição de menor relutância, ou seja, a posição na qual o entreferro dos polos é mínimo. Com a alimentação sendo comutada para a fase B, o rotor tem um deslocamento angular de  $15^\circ$  no sentido horário, buscando novamente reduzir o entreferro. Seguindo a comutação para as fases C, A, B, C..., o rotor obedece a rotação no sentido horário (BASSO, 1994).

O segundo tipo de motor de passo apontado é o a imã permanente que se assemelha a um motor síncrono, cujo rotor é constituído por material com formato cilíndrico magnetizado radialmente e com um determinado número de polos. O estator é composto por chapas magnéticas com polos salientes, as quais são acopladas bobinas de acionamento (ORILLE; HUMET, 1988).

A Figura 12 apresenta o aspecto construtivo de um motor de passo a imã permanente, consistindo de um rotor e um estator bipolares. Os polos salientes do estator suportam os enrolamentos bifásicos das bobinas de acionamento (JUFER, 1985).

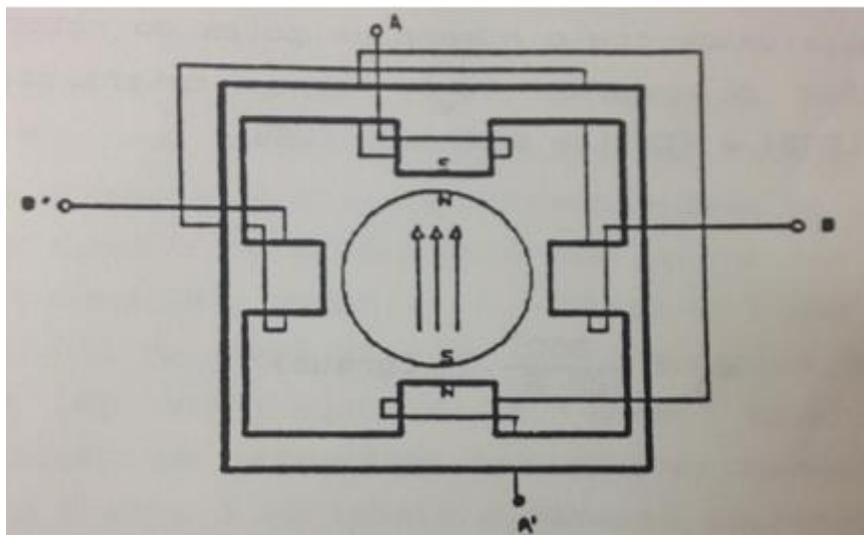
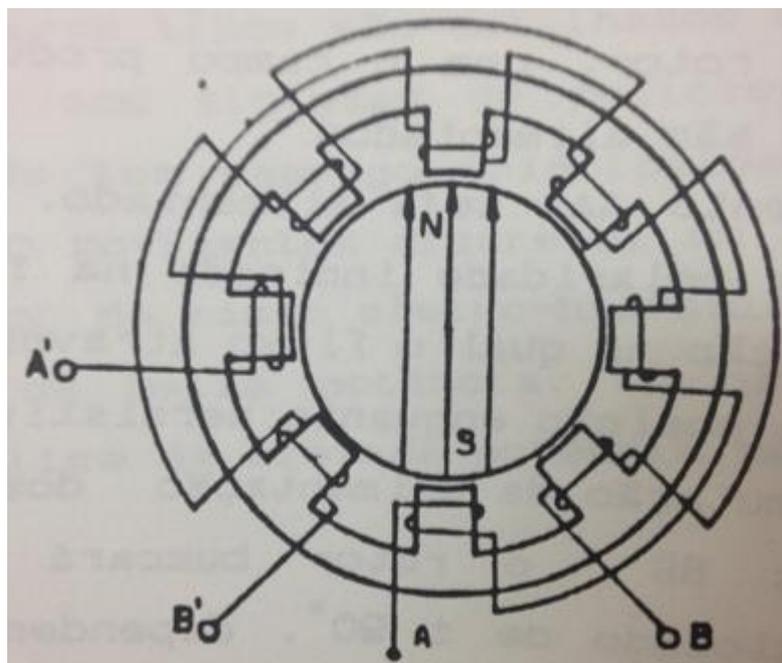


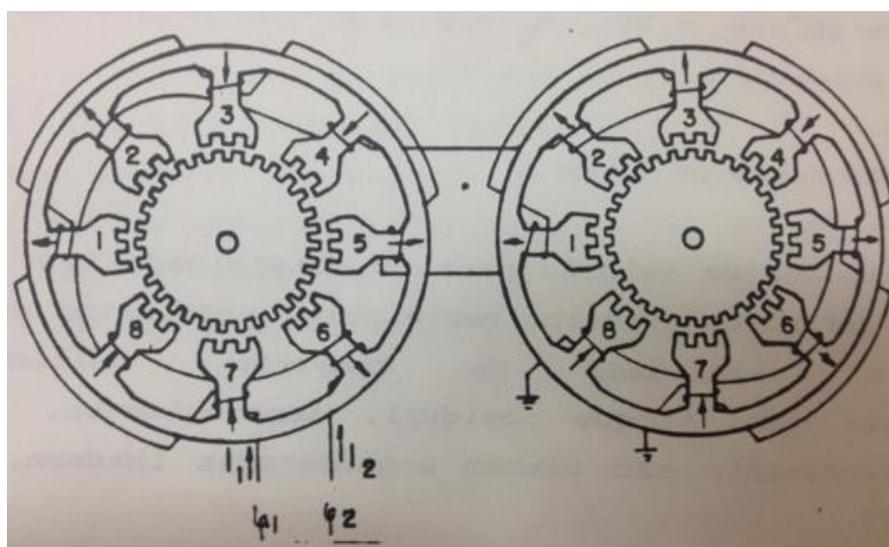
Figura 12 – Aspecto construtivo motor de passo a ímã permanente  
Fonte: Basso, 1994.

O motor tem seu esquemático demonstrado na Figura 13 e funciona com a interação dos fluxos magnéticos decorrentes do campo permanente do rotor com o campo magnético produzido no estator quando os enrolamentos são alimentados. Caso o enrolamento AA' seja alimentado, e uma corrente  $I$  produza o campo com a polaridade indicada na Figura 10, o rotor irá se mover para a posição na qual o fluxo através de AA' é máximo, mantendo-se fixo nesta posição enquanto persistir a alimentação do enrolamento. Com a comutação da alimentação dos enrolamentos AA' para os enrolamentos BB', o rotor buscará a nova posição de equilíbrio, sendo deslocado  $\pm 90^\circ$ , dependendo do sentido da corrente imposta ao enrolamento. Com isso, tem-se que o movimento contínuo discreto do rotor no sentido horário é obtido pelo acionamento das bobinas na sequência: A+, B+, A-, B-, A+, B+. Um movimento em sentido oposto é definido pela sequência inversa A+, B-, A-, B+, A+, B-. Portanto apenas um enrolamento é acionado a cada instante da comutação, o rotor é posicionado a cada  $\pm 90^\circ$  (BASSO, 1994).



**Figura 13 – Motor de passo a ímã permanente para 8 passos por volta**  
**Fonte: Basso, 1994.**

O motor híbrido é a associação das características do motor de passo a ímã permanente e a relutância variável (GAYAKWAD; SOKOLOFF, 1988). Os números de dentes das seções são iguais, sendo que os dentes do estator de uma seção são perfeitamente alinhados com os dentes do estator da outra seção. Já os dentes do rotor das duas seções são defasados entre si em meio dente conforme mostrado na Figura 14.



**Figura 14 – Vista axial do motor de passo híbrido**  
**Fonte: Basso, 1994.**

O ímã permanente é disposto axialmente entre as duas seções e cria um fluxo magnético permanente, polarizando os rotores como norte e sul conforme ilustrado na Figura 15. Um enrolamento envolve os polos 1, 3, 5 e 7 das seções A e B dando origem a fase 1. A fase 2 é distribuída entre os polos 2,4,6 e 8 de cada seção, mostrado na Figura 14. Com o enrolamento da fase 1 alimentado, são criados nas seções quatro polos com as polaridades indicadas na figura acima estabelecendo uma posição fixa no rotor. Quando a alimentação é comutada para a fase 2 o rotor será deslocado de  $\pm 9^\circ$ , sendo que a direção do deslocamento depende da polaridade aplicada à fase.

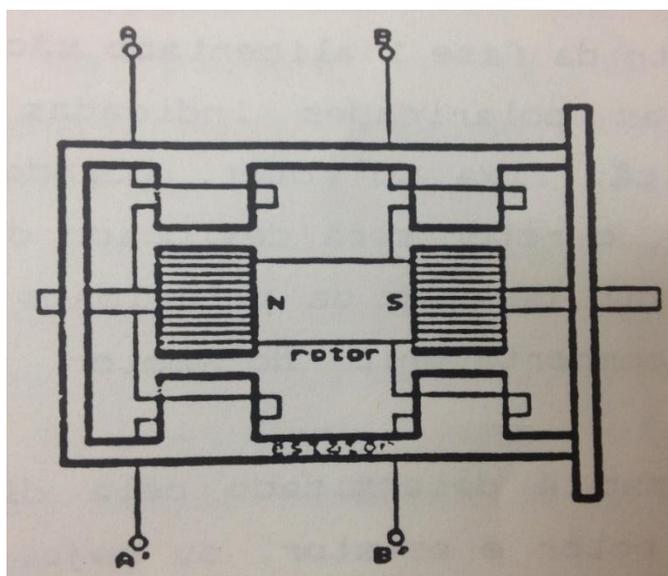


Figura 15 – Vista radial do motor de passo híbrido  
Fonte: Basso, 1994.

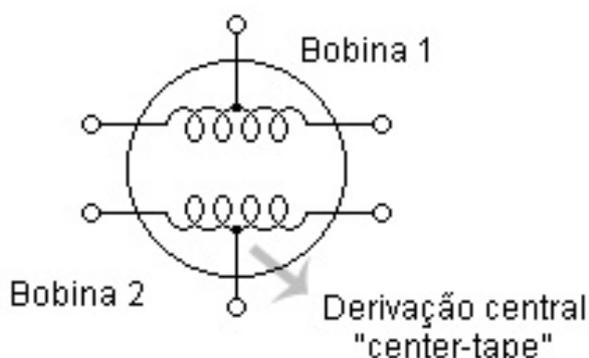
Os critérios de seleção para um determinado tipo de motor são definidos geralmente pelos requisitos de torque, resolução e velocidade de operação. (MADSEN,1980). Adicionalmente existem características como torque residual, amortecimento, robustez, precisão e rendimento. (GILDER *et al.*, 1977).

Segundo Basso (1994), para aplicações em máquinas-ferramenta, os motores híbridos são os mais indicados por apresentarem torques elevados, alta resolução e altas velocidades. Tendo ainda como característica um bom amortecimento, não sendo sujeitos a fortes oscilações.

Os motores de passo podem ser classificados como unipolares ou bipolares.

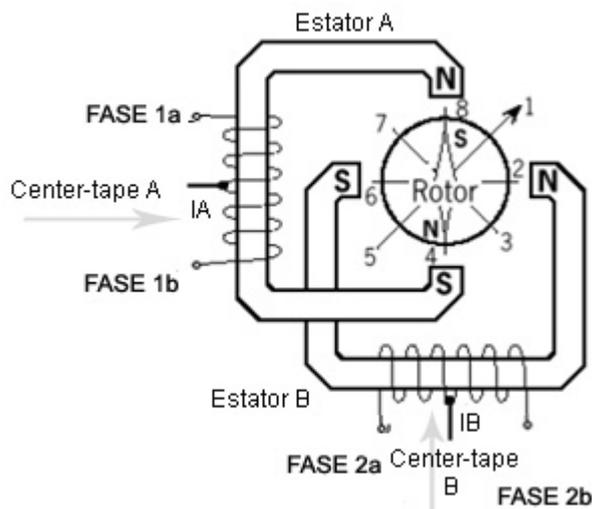
Os motores unipolares possuem uma ligação em comum entre as bobinas. Já os motores bipolares não possuem ligação em comum, sendo assim existe a necessidade de inverter a polaridade de cada bobina para que ocorra o passo. Os motores bipolares são um pouco mais complexos para acionar, porém fornecem maior torque (LAIDMAN, 1999).

Os motores de passo unipolares mais comuns possuem 2 bobinas com 3 fios cada (QUEIROZ, 2003). Cada bobina consiste de um enrolamento com derivação central chamado de “*center-tape*”, ilustrado na Figura 16



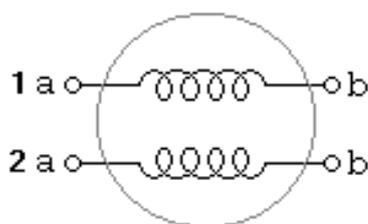
**Figura 16 – Enrolamentos motor de passo unipolar**  
**Fonte: Queiroz, 2003.**

O *center-tape*, tem como função alimentar o motor, enquanto que os terminais quando aterrados, efetuam o controle do movimento. Ao submeter uma das bobinas a uma tensão, o campo magnético induzido no estator (Figura 17), provoca um movimento de rotação no rotor do motor até atingir um determinado ponto de equilíbrio. Este movimento é possível, pois as bobinas do motor são isoladas umas das outras. Então, ao aplicar-se uma tensão na bobina 1 e 2, o campo magnético é invertido sem a necessidade de se inverter o sentido da corrente para efetuar a rotação no eixo do motor. Esta característica permite que o circuito de ativação seja simples e direto, diferente dos motores bipolares.



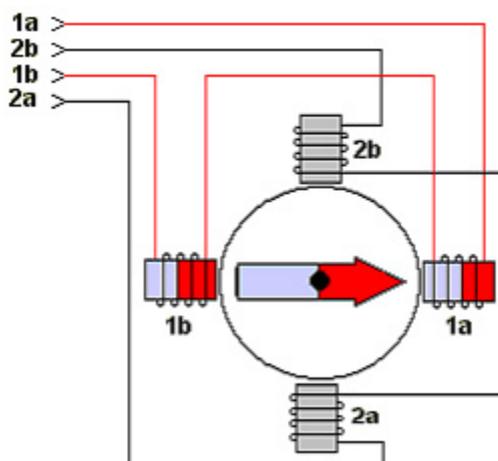
**Figura 17 – Esquemático motor de passo unipolar**  
**Fonte: Queiroz, 2003.**

Os motores de passo bipolares utilizam um circuito de controle mais complexo que os unipolares. São conhecidos pela sua excelente relação tamanho/torque no qual proporcionam um torque superior comparado a um motor unipolar de mesmo tamanho. A forma com que estão dispostos seus enrolamentos é ilustrada na Figura 18.



**Figura 18 – Enrolamento motor de passo bipolar**  
**Fonte: Queiroz, 2003.**

Estes motores são constituídos por enrolamentos separados, sem *center-tape*, que devem ser acionados em ambas direções para permitir o avanço de um passo, ou seja, a polaridade deve ser invertida durante o funcionamento. Por esta característica, o motor foi chamado de bipolar. Diferentes dos unipolares, possuem 4 fios em sua maioria, onde um simples teste de resistência mostra qual dos fios pertence a sua respectiva bobina (QUEIROZ, 2003). A Figura 19 traz o esquemático de um motor bipolar.



**Figura 19 – Esquemático motor de passo bipolar**  
**Fonte: Queiroz, 2003.**

É possível classificar os motores de passo em função do diâmetro do corpo, ou seja, um motor tamanho 34, possui um corpo com o diâmetro de 3,4 polegadas. Os tamanhos mais comuns são: 11, 17, 23, 34, 42 (CONSTANDINOU, 2004).

Apesar do frequente uso em sistemas de posicionamento, motores de passo também podem ser utilizados como motores de rotação constante, com isso podem ser empregados em aplicações em que se requer baixas rotações ou velocidades precisas. Para isto, basta aplicar uma sequência de pulsos com frequência constante (ENGDAHL, 2014).

O acionamento de um motor de passo pode ser executado por 4 tipos de circuitos (BRAGA, 2002), são eles:

- A) Controladores: são circuitos integrados capazes de fornecer a potência necessária para acionar o motor de passo a partir de pulsos de controle oriundos de uma fonte de baixa corrente.
- B) Sequenciadores: tem por finalidade sequenciar pulsos para que o motor rode em um sentido ou em outro. Quando utilizado um computador este sequenciamento pode ser feito por um programa.
- C) Circuito de passo: produz pulsos com tempos definidos de forma que o motor gire na velocidade desejada.
- D) *Drivers* ou Excitadores: são circuitos que possuem a capacidade de controlar a corrente que circula pelos enrolamentos do motor de passo.

Comercialmente encontram-se motores de passo que possuem resoluções de  $90^\circ$  a  $0,72^\circ$  (JONES,1998). Em algumas aplicações são necessárias resoluções angulares menores do que a disponibilizada pelo motor. Nestes casos podem-se utilizar sistemas de redução ou *drives* de micropasso.

O micropasso é uma configuração fornecida pelo *driver* que consiste em um controle de nível de corrente no acionamento das bobinas do motor de passo. A corrente controlada nas bobinas tem o formato de ondas seno e cosseno em quadratura, o que significa que quando uma bobina está aumentando a corrente a outra está diminuindo. Isso ocorre de forma escalonada em que cada nível de corrente é um micropasso, a Figura 20 ilustra como é gerado os micropassos. Um passo completo pode ser dividido em vários micropassos (LAIDMAN, 1999).

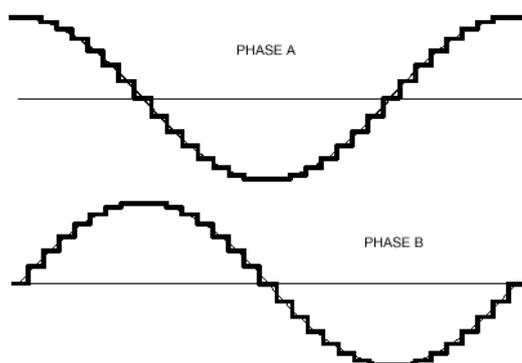


Table 1: 1/8th-Step subdivision current ratios

| Step Series | Current Phase A | Current Phase B | Step Position |
|-------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 0           | 100.0%          | 0.0%            | full step     |
| 1           | 98.1%           | 19.5%           | 1/8 step      |
| 2           | 92.4%           | 38.2%           | 1/4 step      |
| 3           | 83.1%           | 55.5%           | 3/8 step      |
| 4           | 70.7%           | 70.7%           | 1/2 step      |
| 5           | 55.5%           | 83.1%           | 5/8 step      |
| 6           | 38.2%           | 92.4%           | 3/4 step      |
| 7           | 19.5%           | 98.1%           | 7/8 step      |
| 8           | 0.0%            | 100.0%          | full step     |
| x†          | 100.0%          | 100.0%          | 1/2 step      |

† 2-Phase drive at 100%  $\approx$  141% torque.

**Figura 20 - Representação de ondas na aplicação de micropasso**

**Fonte: Laidman, 1999.**

### 2.3.3 Programação CNC

Comando numérico (NC) é “[...] um sistema de controle capaz de receber informações numéricas por meio de entrada própria, compilar estas informações e transmiti-las em forma de comando à máquina operatriz, de modo que esta, “sem” a intervenção do operador, realize as operações na sequência programada” (VOLPATO, 2006).

Genericamente, pode-se dizer que NC é uma maneira que o homem encontrou para comunicar-se com a máquina por meio de códigos. É a conversão das

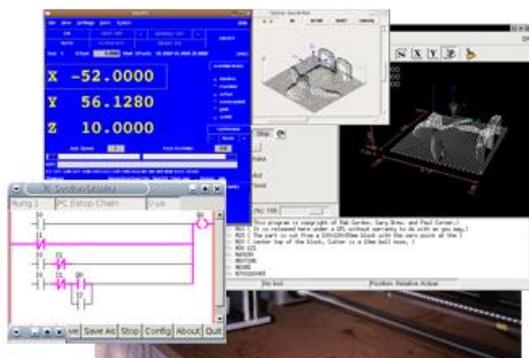
informações de um processo em letras e números capazes de serem interpretadas e processadas pelo computador.

O código de programação para uma máquina CNC deve conter os dados necessários para realização da tarefa proposta. Ele deve responder as seguintes perguntas: o que fazer (peça), onde (dados geométricos), como (sequência de operação) e quando (ferramenta) (VOLPATO, 2006). O padrão de programação mais utilizado é o ISO 6983, conhecido como código G.

#### 2.3.4 Programa EMC<sup>2</sup>

O programa EMC<sup>2</sup> (*Enhanced Machine Controller Project*) é um *software* livre que funciona em plataforma Linux e possibilita o controle de máquinas como fresadoras, tornos, robôs, entre outros (LINUX CNC, 2014). O EMC<sup>2</sup> processa programas CNC em linguagem ISO e oferece uma interface gráfica que possibilita a visualização em tempo real da peça no processo bem como dados sobre o mesmo, tais como velocidade, posição, avanço, etc.

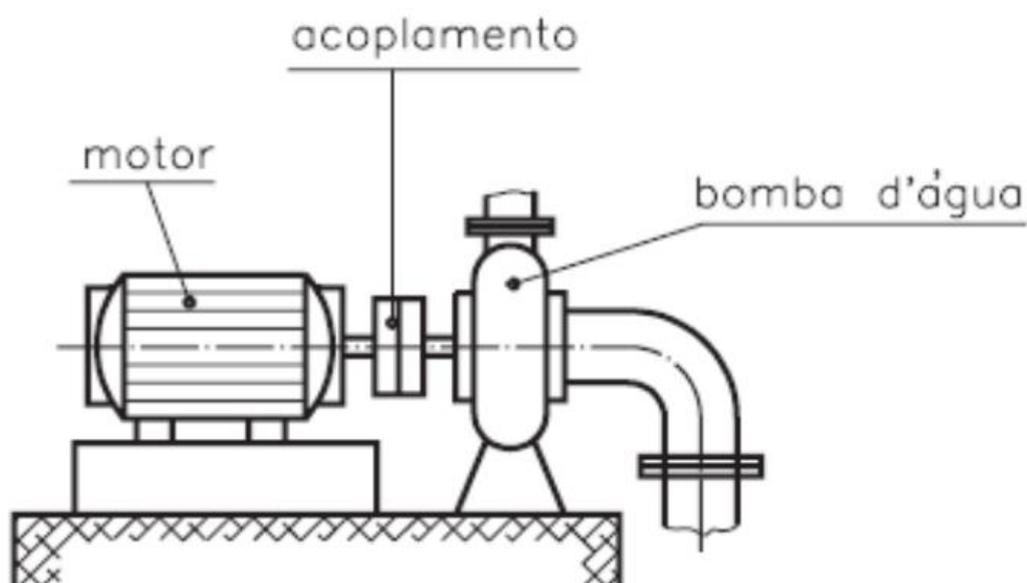
Utilizando a porta paralela como interface entre controle e acionamento, é possível controlar até quatro eixos de uma máquina. Para o controle de mais eixos é necessário implementá-los no código do programa e utilizar a porta serial. O EMC<sup>2</sup> possibilita controlar até nove eixos simultaneamente (LINUX CNC, 2014). Na Figura 21 é mostrado a interface gráfica do EMC<sup>2</sup>.



**Figura 21 - Interface gráfica do programa EMC<sup>2</sup>**  
**Fonte: Linux CNC, 2014.**

### 2.3.5 Acoplamentos e parafusos

É um conjunto mecânico que transmite movimento entre duas árvores ou eixos. Podem ser “fixos” quando unem árvores como se fosse uma peça única, “elásticos” quando suavizam movimentos bruscos e admitem desalinhamento paralelo e/ou angular ou “móveis” quando somente acoplam com movimentação através de acionamento (MORO e AURAS, 2006). A Figura 22 mostra um exemplo de uso de um acoplamento.



**Figura 22 - Exemplo do uso de acoplamento**  
Fonte: Moro e Auras, 2006.

O parafuso é um elemento de ligação formada por um corpo cilíndrico, sendo cabeça (há parafusos sem) e rosca (há alguns com parte da haste sem rosca). É empregado para fixação de peças variadas, de forma não permanente e que podem ser facilmente montadas e desmontadas. Existem quatro grandes grupos de parafusos, Figura 23, são: passantes, não passantes, de pressão e prisioneiros (MORO; AURAS, 2006).

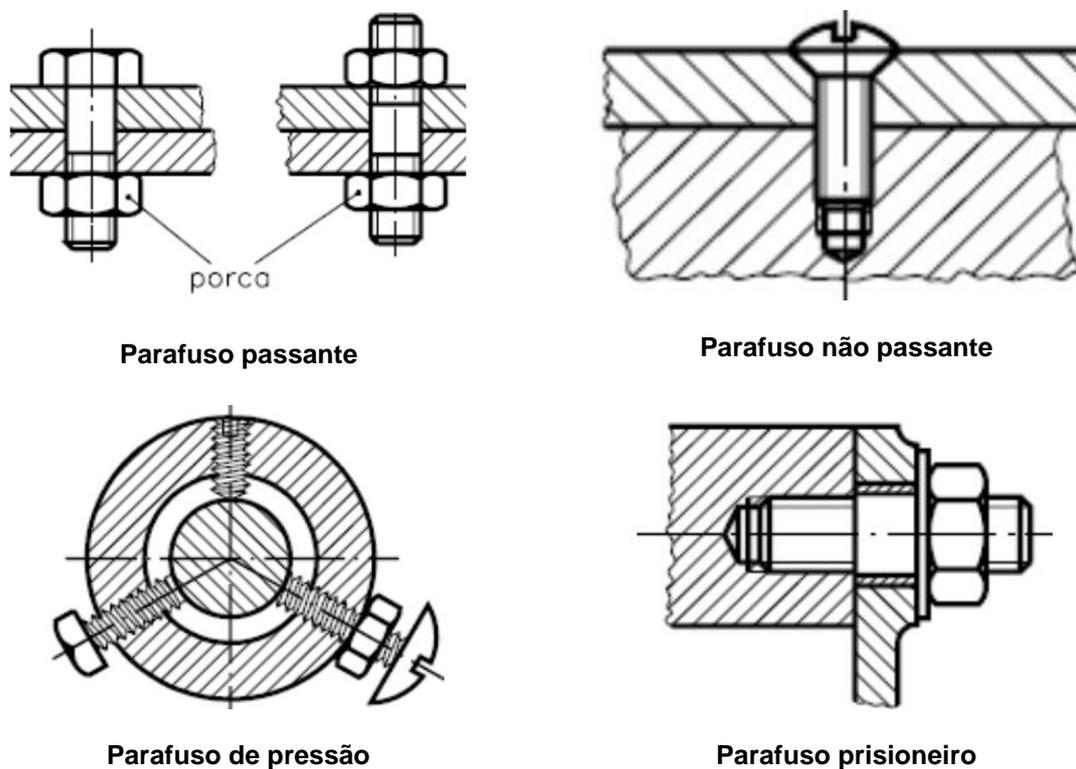


Figura 23 – Tipos de parafusos  
 Fonte: Adaptado de Moro e Auras, 2006.

### 2.3.6 PTFE – “TEFLON”

São vários os polímeros utilizados em aplicações tribológicas, entre eles se destacam o poliacetal, o polietileno e o politetrafluoretileno (PTFE - nome comercial: TEFLON), por apresentarem ótimas propriedades tais como: boa capacidade de lubrificação, baixo peso e alta resistência à corrosão (KHODDAMZADEH *et al.*, 2009).

Por apresentar o menor coeficiente de atrito estático e cinético o PTFE é um dos mais utilizados (CONTE; IGARTUA, 2012), tendo como uma aplicação seu emprego como lubrificante sólido (ÜNLÜ; UZKUT, 2010).

A crescente exigência de performance mecânica pela indústria, criou a necessidade de combinar as propriedades do PTFE às de cargas minerais e metálicas.

Em geral, o uso de material carregado melhora a resistência ao desgaste, reduz a taxa de fluência e deformação inicial, aumentando a dureza e a condutividade térmica, e diminui o coeficiente de expansão térmica. Uma das cargas que podem ser

incorporadas ao PTFE é o carbono amorfo (coque de petróleo ou coque parcialmente grafitado) que é uma das cargas mais inertes, sendo atacado apenas por metais alcalinos líquidos e por ligações de flúor sob pressão e temperaturas elevadas (PTFE, 2010). Com a carga de carbono amorfo, o polímero passa a ser chamado de teflon grafitado, ilustrado na Figura 24. As propriedades mecânicas do teflon podem ser conferidas no ANEXO A.

As principais vantagens do teflon grafitado são as seguintes características:

- Inerte quimicamente;
- Boa resistência ao desgaste a seco e com água;
- Boa condutividade térmica;



**Figura 24 – Tarugo de teflon grafitado**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 2.3.7 RENSHAPE

As resinas RenShape 5166 e RenShape 460, possuem composição a base de poliuretano e são modernas alternativas para produzir peças utilizadas como modelos visuais, maquete, ferramental rápido, entre outros.

A quantidade, tipo e forma da carga de reforço de uma resina tem forte influência em suas propriedades. A interação interfacial entre a resina e a carga de reforço também altera o desempenho mecânico do compósito (VASCONCELOS *et al.*, 2006). Na Tabela 1 são mostradas as propriedades mecânicas dos modelos de RenShape disponíveis no mercado.

**Tabela 1 – Propriedades mecânicas do RenShape**

| Material                 | Dureza<br>Shore<br>D | Densidade<br>(lbs/ft <sup>3</sup> ) | Resistência<br>à tração<br>(psi) | Resistência<br>à compressão<br>(psi) | Módulo<br>Elasticidade<br>(psi) | Resistência<br>à flexão<br>(psi) |
|--------------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| RenShape 5014            | -                    | 4                                   | 105                              | 95                                   | -                               | 116                              |
| RenShape 5015            | -                    | 6                                   | 160                              | 130                                  | -                               | 190                              |
| RenShape 5018            | -                    | 8                                   | 290                              | 220                                  | -                               | 310                              |
| RenShape 5020            | 27                   | 10                                  | 350                              | 260                                  | -                               | 350                              |
| RenShape 5025            | 27                   | 15                                  | 600                              | 560                                  | -                               | 780                              |
| RenShape 5030            | 33                   | 20                                  | 895                              | 1,13                                 | -                               | 1,33                             |
| RenShape 5045            | 42                   | 30                                  | 1,25                             | 2,22                                 | -                               | 2,4                              |
| RenShape 440             | 54                   | 34                                  | 1,3                              | 1,4                                  | 105                             | 2,3                              |
| RenShape 5440            | 54                   | 35                                  | 1,3                              | 1,4                                  | 105                             | 2,3                              |
| RenShape 450             | 65                   | 41                                  | 2,3                              | 2,8                                  | 135                             | 4                                |
| RenShape BM70            | 57                   | 42                                  | 1,57                             | 1,93                                 | 120,72                          | 2,59                             |
| RenShape 5460            | 58                   | 43                                  | 1,886                            | 2,075                                | 127                             | 3,2                              |
| RenShape 460             | 64                   | 48                                  | 1,8                              | 2,2                                  | 181                             | 3,7                              |
| RenShape 470             | 90                   | 104                                 | 4,7                              | 9,5                                  | 866                             | 8,7                              |
| RenShape 472             | 81                   | 55                                  | 7                                | 10,9                                 | 460                             | 9,54                             |
| RenShape 473             | 72                   | 50                                  | 2,5                              | 3,5                                  | 210                             | 4                                |
| RenShape 474             | 73                   | 50                                  | 6,75                             | 8                                    | 227                             | 8                                |
| RenShape 550             | 82                   | 53                                  | 7                                | 10,5                                 | 415                             | 8,8                              |
| RenShape 5166            | 90                   | 103                                 | 4,875                            | 9,5                                  | 840                             | 8                                |
| RenShape 5169            | 85                   | 75                                  | 9                                | 8,8                                  | 366                             | 14                               |
| RenShape 5179            | 85                   | 73                                  | 10                               | 12,7                                 | 325                             | 15,6                             |
| RenShape 5008<br>(Epoxy) | 68                   | 42                                  | 3,5                              | 8,2                                  | 350                             | 4,6                              |
| RenShape 5065<br>(Epoxy) | 70                   | 49                                  | 3,076                            | 8,264                                | 203,863                         | 4,9                              |
| RenShape 2000<br>(Epoxy) | 91                   | 112                                 | 9                                | 36,5                                 | 900                             | 12                               |
| ASTM                     | D-2240               | D-792                               | D-638                            | D-695                                | D-695                           | D-790                            |

Fonte: Adaptado de <http://www.freemansupply.com/tables/renshape.htm>

### 3 MESA DE COORDENADAS XYZ

No NUFER existe uma mesa de coordenadas projetada para comportar um cabeçote para executar a furação de placas de circuitos impressos. A máquina é acionada por motores de passo bipolares, com *drivers* de micropasso em todos os eixos. O sensoriamento da máquina é simples, tendo apenas sensores de fim de curso utilizados para referenciar a máquina quando esta é ligada. A mesa apresenta capacidade de deslocar até 20mm no eixo Z e área útil de 300x500mm nos eixos X e Y. O deslocamento de seus eixos é feito por transmissão via fusos de esferas recirculantes, possuindo a capacidade de trabalhar à uma velocidade de até 5mm/s no eixo Z e 17mm/s nos eixos X e Y.

Esta máquina encontrava-se inoperante devido a problemas no sensor do eixo X e por apresentar o motor do eixo Z queimado. A Figura 25 representa a mesa de coordenadas citada.

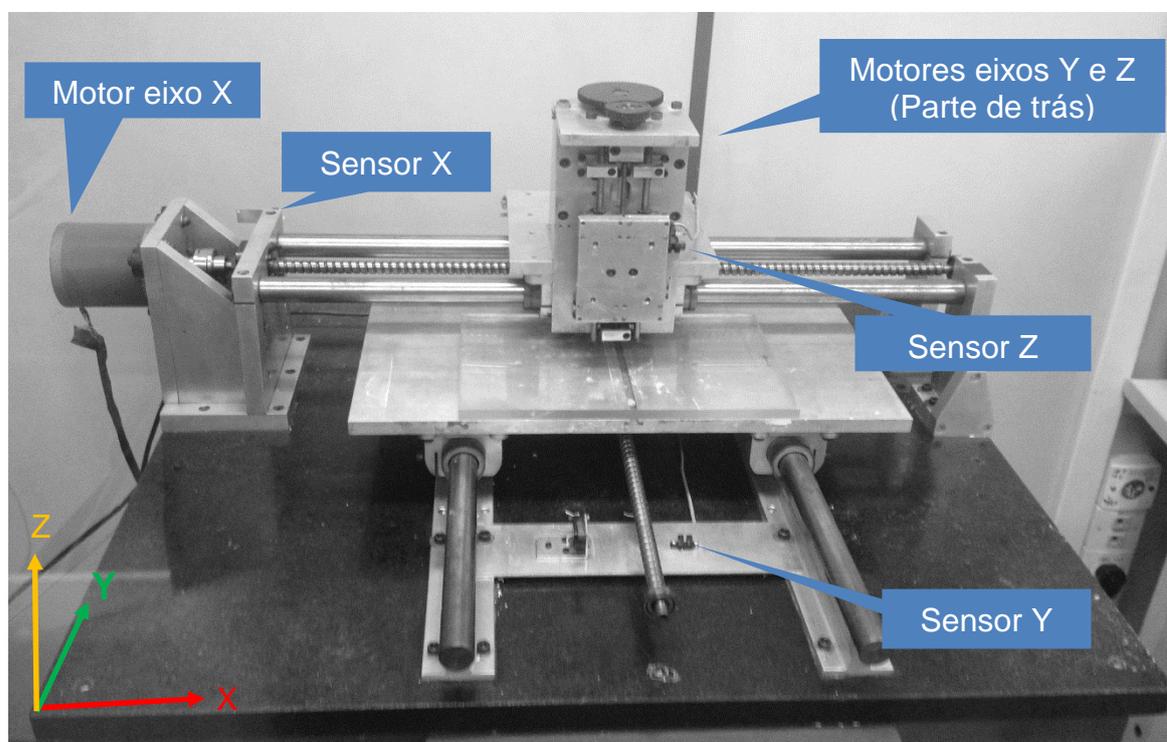


Figura 25 – Mesa de coordenadas XYZ  
Fonte: Autoria própria.

Foi averiguado que o sensor do eixo X estava com mau contato em seus terminais, constatado pela falta de condutividade entre o fio do sensor e o fio que transmite o sinal do sensor ao computador. Isso pode ter sido causado pela chamada “solda fria” em que impurezas ou falta de calor no momento da soldagem, podem causar a não condutividade, mesmo que os elementos estejam conectados. A solução foi simples, foi necessário refazer a solda e o sensor funcionou.

No motor do eixo Z, a causa mais provável da queima foi a configuração errônea das chaves que determinam a corrente máxima que o *driver* pode entregar ao motor. As informações do rótulo do motor salientam as características do motor de 2,2A/fase e 200 passos/revolução. A configuração de corrente encontrada no *driver* de micropasso era de 7,2A, quando deveria ser 4,45A conforme a folha de dados do *driver* presente no ANEXO B. Isso possivelmente causou o superaquecimento do motor acarretando em sua queima.

A solução para o eixo Z foi realizar a troca do motor por outro motor disponível no NUFER, apresentado na Figura 26. Este motor possui o flange de fixação NEMA 23, o mesmo do motor que queimou, com características de conexão bipolar, 200 passos/revolução, duas bobinas de 2,4A de corrente e alimentação máxima de 87Vdc. O ajuste mais adequando das chaves de corrente do *driver* para este motor é a configuração de 5,14A, corresponde ao valor máximo da corrente de pico que o motor pode receber, podendo causar um leve sobreaquecimento insuficiente para a queima do componente. O motor substituto também apresenta um defeito em uma das pontas do flange de fixação, mas este defeito não influenciou em sua montagem, conforme visto na Figura 27.

Após a realização da manutenção no sensor do eixo X e a troca do motor do eixo Z, a máquina funcionou perfeitamente, sendo controlada pelo software EMC<sup>2</sup>, que é responsável pela leitura e conversão do código G em pulsos elétricos. A Figura 28 apresenta a configuração dos pinos da porta paralela no software EMC<sup>2</sup>.

Pode-se notar que apenas os pinos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 11, 12 e 13 são cruciais para o deslocamento seguro dos eixos XYZ, sendo que os demais pinos servem para o controle de processo de usinagem ou para o acionamento do quarto eixo.



Figura 26 – Motor substituto eixo Z  
Fonte: Autoria própria.

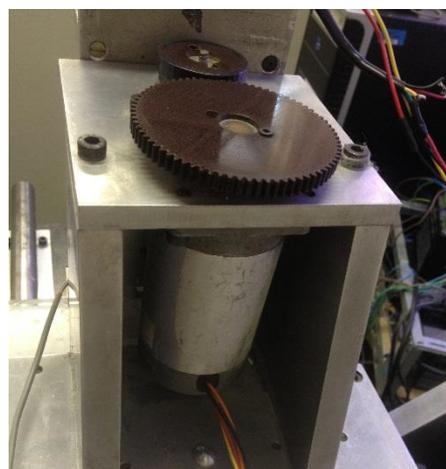


Figura 27 – Montagem do motor do eixo Z  
Fonte: Autoria própria.

EMC2 Stepper Mill Configuration

### Parallel Port Setup

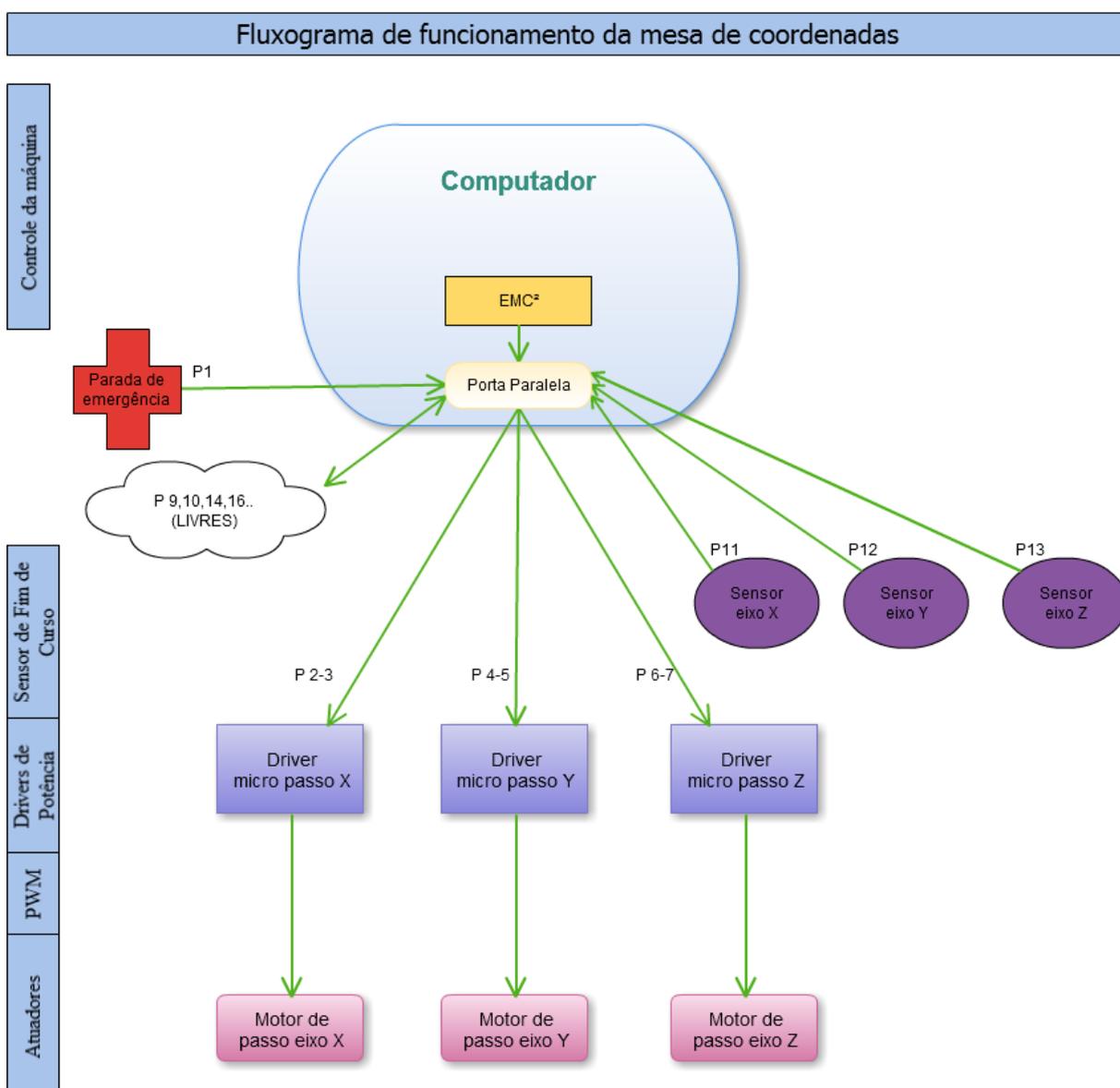
| Outputs (PC to Mill): |                  | Invert                              | Inputs (Mill to PC): |                        | Invert                   |
|-----------------------|------------------|-------------------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|
| Pin 1:                | ESTOP Out        | <input type="checkbox"/>            | Pin 10:              | Unused                 | <input type="checkbox"/> |
| Pin 2:                | X Step           | <input type="checkbox"/>            | Pin 11:              | Maximum Limit + Home X | <input type="checkbox"/> |
| Pin 3:                | X Direction      | <input type="checkbox"/>            | Pin 12:              | Maximum Limit + Home Y | <input type="checkbox"/> |
| Pin 4:                | Y Step           | <input type="checkbox"/>            | Pin 13:              | Maximum Limit + Home Z | <input type="checkbox"/> |
| Pin 5:                | Y Direction      | <input checked="" type="checkbox"/> | Pin 15:              | Unused                 | <input type="checkbox"/> |
| Pin 6:                | Z Step           | <input type="checkbox"/>            |                      |                        |                          |
| Pin 7:                | Z Direction      | <input type="checkbox"/>            |                      |                        |                          |
| Pin 8:                | Spindle CW       | <input type="checkbox"/>            |                      |                        |                          |
| Pin 9:                | Spindle CCW      | <input type="checkbox"/>            |                      |                        |                          |
| Pin 14:               | Coolant Flood    | <input type="checkbox"/>            |                      |                        |                          |
| Pin 16:               | A Step           | <input type="checkbox"/>            |                      |                        |                          |
| Pin 17:               | Amplifier Enable | <input type="checkbox"/>            |                      |                        |                          |

Output pinout presets:

Figura 28 – Configuração porta paralela no EMC<sup>2</sup>  
Fonte: Autoria própria.

O fluxograma de funcionamento da mesa de coordenadas pode ser verificado na Figura 29.

Com esta representação é possível ter uma ideia de como é feito o controle da máquina, visto que o EMC<sup>2</sup> instalado em um computador envia pela porta paralela os pulsos para acionamento dos *drivers* de potência dos motores conforme as instruções do código G e também monitora os sensores de fim de curso evitando que colisões aconteçam.



**Figura 29 – Fluxograma de funcionamento da mesa de coordenadas**  
 Fonte: Autoria própria.

## 4 DESENVOLVIMENTO DO CABEÇOTE DE EXTRUSÃO

Este capítulo aborda a etapa de desenvolvimento de um cabeçote extrusor que irá realizar o processamento de massas cerâmicas. São descritas as fases cumpridas para a criação do protótipo do cabeçote, os testes de extrusão e as melhorias implementadas para o aperfeiçoamento dos resultados. Para execução desta etapa foram estudadas as melhores alternativas para torná-la possível, levando em conta os materiais e maquinário disponíveis para fabricação dos elementos e mecanismos na UTFPR.

### 4.1 ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DO CABEÇOTE

A metodologia proposta para o desenvolvimento e execução do projeto seguiu a seguinte sequência:

1. Estudo dos princípios de deposição de materiais cerâmicos já existentes, realizando pesquisas em literaturas relacionadas à manufatura aditiva;
2. Criação de uma concepção de deposição de material cerâmico;
3. Elaboração do projeto estrutural do cabeçote;
4. Escolha da matéria prima das peças que serão fabricadas;
5. Escolha dos componentes padrão a serem empregados no protótipo (parafusos, motores, porcas, abraçadeiras, fontes, *drives*, controladores, entre outros);
6. Planejamento do processo de usinagem, fabricação e montagem dos componentes que serão feitos na universidade;
7. Análise do software de controle da mesa de coordenadas, para integração do controle do cabeçote com o código G;
8. Escolha da plataforma de programação e criação do programa de controle do cabeçote;
9. Definição da massa cerâmica que será processada;
10. Realização de testes de extrusão do cabeçote;

A seguir serão explanadas as ações realizadas para que os tópicos citados fossem cumpridos.

#### 4.1.1 **Estudo dos princípios de deposição de materiais cerâmicos**

Para fazer o levantamento dos princípios de deposição de materiais cerâmicos existentes, foram consultados livros, artigos acadêmicos e sites de internet. As referências teóricas relevantes encontradas podem ser observadas no capítulo 2, Revisão Bibliográfica, e as fontes consultadas estão no capítulo 7, Referências Bibliográficas.

Dos princípios estudados o que mais se identifica com a proposta deste trabalho é o de Modelagem por Fusão e Deposição de Cerâmicos (FDMC). Os trabalhos desenvolvidos com este princípio geralmente funcionam com extrusão de um filamento cerâmico com carga de materiais termoplásticos, processo em que o filamento atua como um êmbolo, realizando a extrusão do material através de um bico com um furo de diâmetro inferior ao do filamento original.

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de um cabeçote capaz de extrudar massas cerâmicas. Como não foi encontrado na literatura trabalhos que abordassem o processamento de massas cerâmicas para manufatura aditiva, foi decidido criar uma concepção em que o cabeçote seria composto por um sistema de extrusão por rosca transportadora.

É sabido que o princípio de extrusão utilizando rosca transportadora é bastante utilizado em extrusoras de grande porte de plásticos e também de cerâmicos. Quando se trata de uma extrusora de grande porte, existe uma grande quantidade de massa cerâmica no funil de alimentação e seu peso gera pressão suficiente para alimentar a rosca transportadora que conduzirá a massa até o bico de extrusão. Como o cabeçote em questão trabalhará com pequenas quantidades de massa cerâmica, existe o receio de que apenas o peso da massa cerâmica não seja suficiente para alimentar a rosca transportadora, uma vez que a massa possui uma alta viscosidade.

Para evitar o provável problema de alimentação, foi concluído a necessidade de um segundo elemento no cabeçote. Foi decidido o emprego de um êmbolo que seria responsável por alimentar a rosca transportadora.

#### 4.1.2 Criação de uma concepção de deposição de material cerâmico

Como pode-se observar na Figura 30, o sistema funcionará com a atuação de um êmbolo que alimenta uma rosca que irá transportar a massa cerâmica até o bico, pelo qual ocorrerá a extrusão. Para melhor entendimento sobre o funcionamento do cabeçote, todos os elementos serão individualizados e detalhados no decorrer do trabalho.

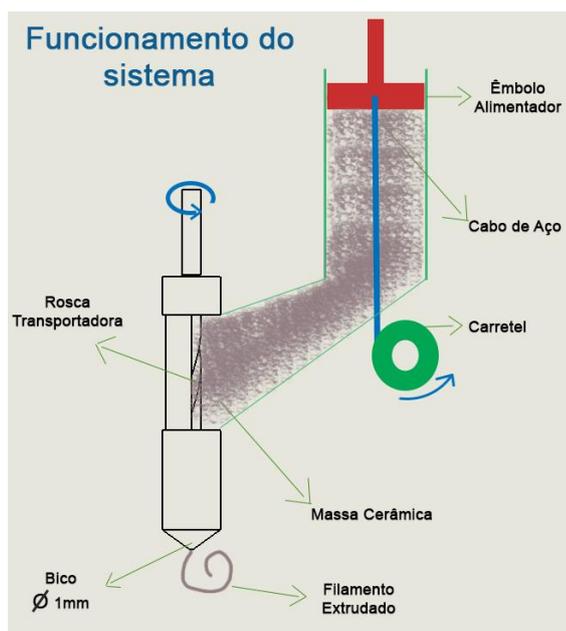


Figura 30 – Concepção do cabeçote de extrusão  
Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.3 Projeto estrutural do cabeçote

O projeto dos elementos do cabeçote foi feito com o auxílio de um programa CAD (*Computer Aided Design*), no caso o SolidWorks versão 2013 desenvolvido pela empresa Dassault Systèmes S.A.

O projeto do corpo do cabeçote foi feito partindo da concepção criada no item 4.1.2, visto que a matéria-prima empregada para fabricação seria o bloco mesclado criado conforme explanado no item 4.1.4.1.

Para definição da geometria do cabeçote foi necessário determinar alguns requisitos que o cabeçote deveria atender, listados na Tabela 2.

| <b>Tabela 2 - Requisitos básicos da estrutura do cabeçote</b> |                  |   |
|---|------------------|---|
| <b>Importância</b>  | <b>Requisito</b> | <b>Descrição</b>  |
| 1   | Montagem         | Ser fácil de montar e desmontar   |
| 2   | Posicionamento   | Possuir um sistema que garanta o posicionamento das partes do cabeçote                        |
| 3   | Flexibilidade    | Ter geometria preparada para receber mudanças caso seja necessário                            |
| 4   | Robustez         | Ser resistente  |
| 5   | Limpeza          | Possuir geometria com bom acesso para limpeza   |
| 6   | Fabricação       | Ter fabricação possível com o ferramental e maquinário disponível na UTFPR – Campus Curitiba. |

Fonte: Autoria própria.

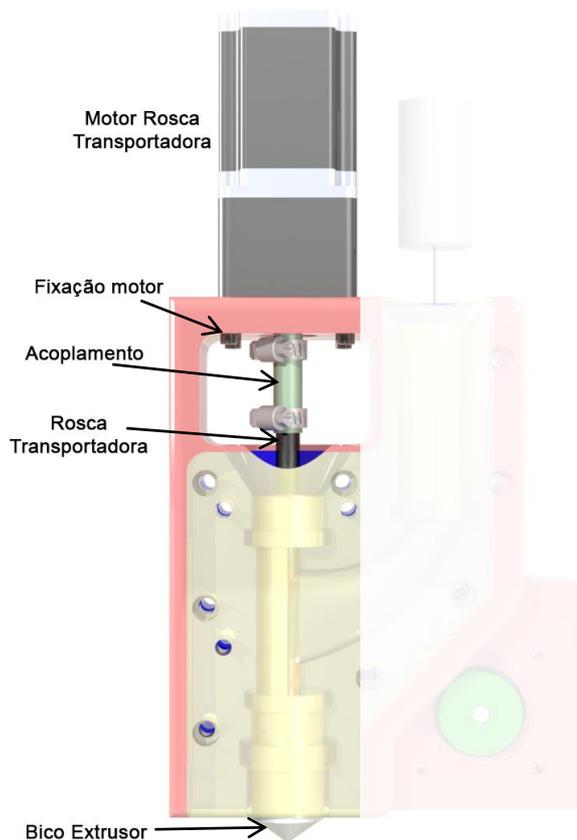
A modelagem do corpo do cabeçote foi feita em quatro partes:

- Montagem da rosca transportadora
- Montagem do êmbolo
- Montagem do canal de alimentação
- Elementos de posicionamento e fixação

Os desenhos detalhados das peças e da montagem do cabeçote são encontrados no APÊNDICE A.

#### 4.1.3.1 Setor da Rosca Transportadora

A Figura 31 mostra o setor da rosca transportadora, no qual foi dado maior atenção na fixação do motor que será acoplado na rosca transportadora, no acesso ao acoplamento da rosca e no posicionamento do bico extrusor.

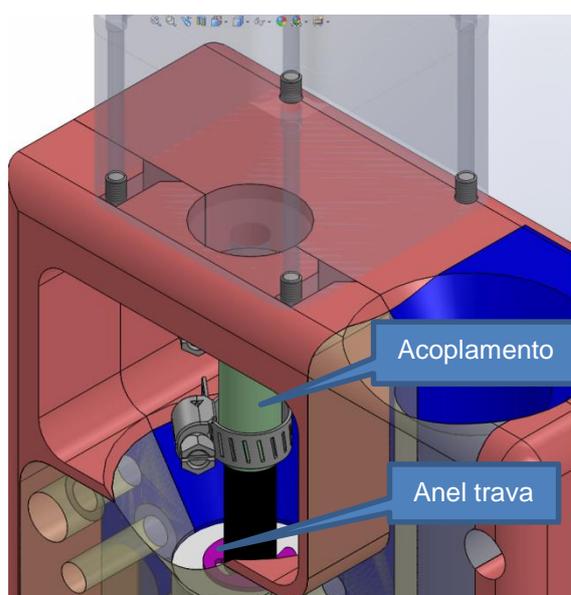


**Figura 31 – Área da rosca transportadora**  
Fonte: Autoria própria.

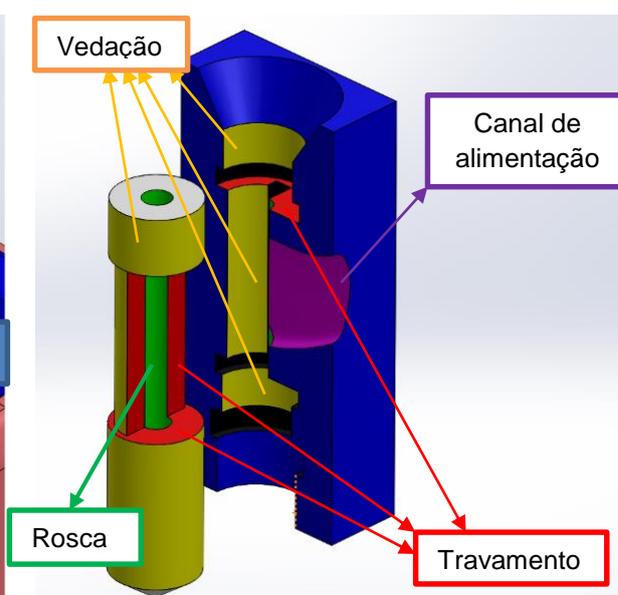
Na Figura 32, pode-se observar que para tornar a montagem do cabeçote mais rápida e, se necessário, possibilitar o aperto das abraçadeiras do acoplamento do motor, foi desenvolvida uma geometria que permite o acesso ao acoplamento (cor verde) e ao anel limitador da rosca transportadora (cor lilás), permitindo assim que sejam feitos reparos sem que haja a necessidade de abrir o corpo do cabeçote durante um teste funcional, o que descartaria a massa cerâmica presente no interior do cabeçote. A Figura 32 ainda ilustra como é feita a fixação do motor da rosca

transportadora, realizada através de quatro parafusos que o prendem ao corpo do cabeçote.

A Figura 33 destaca o encaixe do bico extrusor, para melhor ilustrar foi adotado o uso de cores. As regiões destacadas na cor vermelha são anteparos que travam a geometria do bico, garantindo um posicionamento adequado que evita o deslocamento do bico durante a extrusão. As partes sinalizadas em amarelo correspondem as faces de vedação que necessitam de um bom acabamento garantindo que a massa cerâmica não perca água durante o processo. A região em verde é onde fica a rosca transportadora e região lilás corresponde ao canal de alimentação da rosca transportadora.



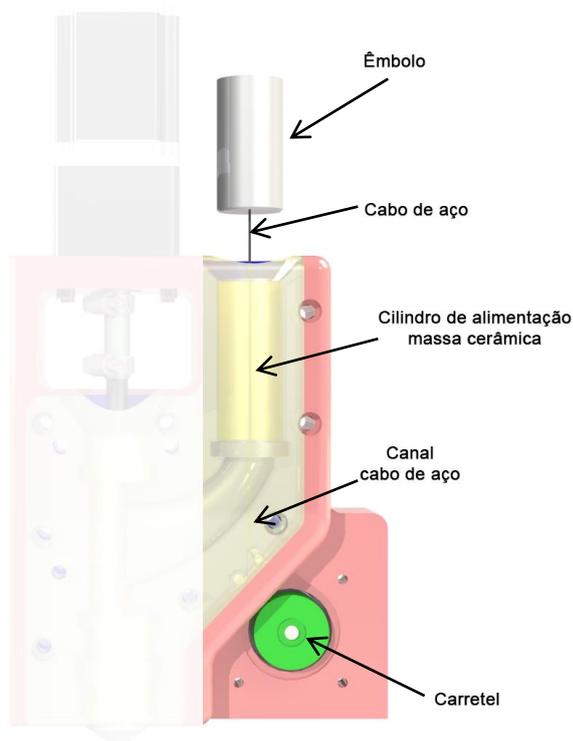
**Figura 32 – Fixação do motor da rosca transportadora**  
Fonte: Autoria própria.



**Figura 33 – Fixação do bico ao corpo do cabeçote**  
Fonte: Autoria própria.

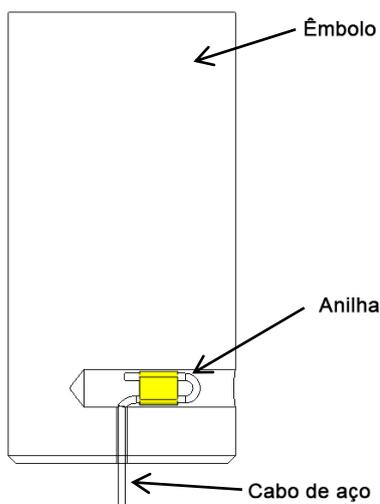
#### 4.1.3.2 Setor do êmbolo

Neste setor, ilustrado na Figura 34, foi dada maior atenção ao êmbolo, ao cilindro de alimentação de material cerâmico, ao canal do cabo de aço e ao carretel.



**Figura 34 – Área do êmbolo**  
**Fonte: Autoria própria.**

Para que fosse possível prender o cabo de aço ao êmbolo e ao carretel foi utilizada uma anilha de pressão, mostrada no item 4.1.4.4. Observa-se na Figura 35, que a geometria adotada para realizar a fixação do êmbolo ao cabo de aço evita que haja fuga de material cerâmico quando for empregada pressão ao sistema, ou seja, mesmo que se tenha invasão de massa cerâmica pelo furo por onde passa o cabo de aço, este material não terá por onde escapar, já que as paredes do cilindro de alimentação irão vedar o sistema.

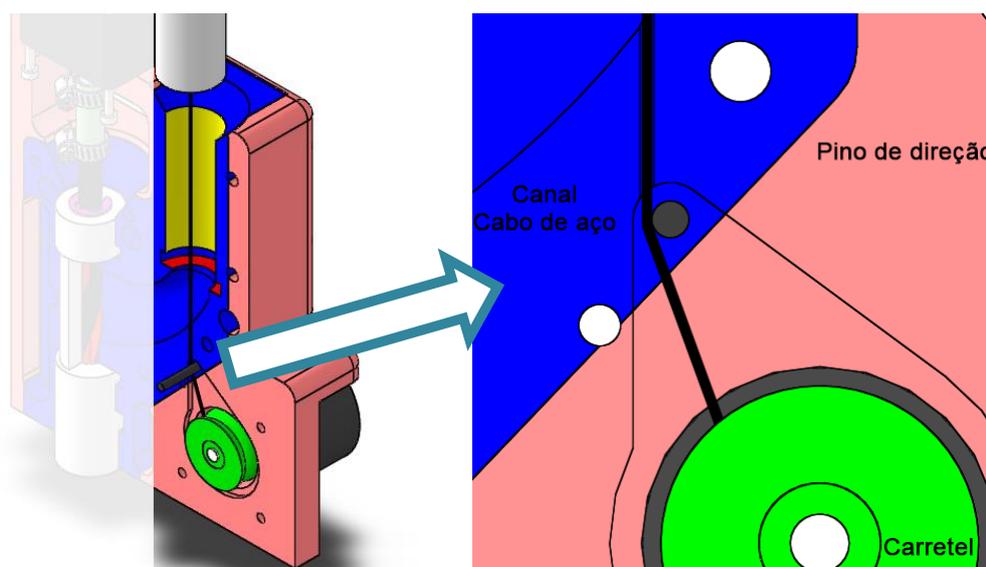


**Figura 35 – Fixação do cabo de aço ao êmbolo**  
**Fonte: Autoria própria.**

O cilindro de alimentação possui 30mm de diâmetro interno e 90mm de altura, foi desenhado de forma a comportar um volume útil de 63.617,25 milímetros cúbicos de material, o que representa o volume de um cubo maciço de aproximadamente 40mm de lado com cerca de 145 gramas de massa cerâmica. O planejamento do processo de usinagem do interior do cilindro é importante, pois a existência de uma folga que deixe a massa cerâmica subir entre a parede externa do êmbolo e a parede interna do cilindro, pode significar uma solicitação maior do motor do carretel, podendo causar a ruptura do cabo de aço devido à resistência causada pelo atrito da massa entre as paredes. No projeto, foi prevista uma folga de 0,1mm entre as partes, permitindo apenas a fuga do ar presente no sistema. Na Figura 36 está representada, em amarelo, a parede interna do cilindro de alimentação e, em vermelho, tem-se uma geometria que possibilitaria a instalação de um tubo de teflon grafitado no cabeçote caso o atrito fosse muito grande.

Na Figura 36, tem-se também o canal pelo qual o cabo de aço deve passar para enrolar no carretel, idealmente este canal deveria possuir a mesma geometria que a seção do cabo de aço utilizado, mas pela falta de ferramentas adequadas para a usinagem, foi decidido construí-lo com perfil quadrado de 1,5mm de lado. Esta opção foi feita devido ao receio de que os 500N suportados por um cabo de aço de 1mm de diâmetro fossem insuficientes para alimentar a rosca, sendo necessário um cabo de aço mais resistente. O diâmetro do cabo de aço encontrado para substituir o cabo de

500N é de 1,5mm e suportaria 800N. Na saída do canal do cabo de aço tem-se um pino de direção, que como o nome sugere, direciona o cabo de aço até o núcleo do carretel, impedindo que haja sollicitação mecânica do epóxi da parede do canal, o que poderia causar o alargamento do canal por onde passa o cabo de aço e o possível início de vazamento da massa cerâmica.



**Figura 36 – Cilindro de alimentação e canal do cabo de aço**  
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 37 temos o carretel, a peça considerada mais importante e complexa do setor de alimentação. Este elemento deve possuir um controle velocidade impecável para que não influencie negativamente no processo de extrusão. Um carretel com velocidade não contínua gera uma alimentação descontrolada, podendo empurrar mais ou menos massa em direção a rosca transportadora, o que causa picos de pressão dentro do cilindro e conseqüentemente uma extrusão instável.

Primeiramente imaginava-se que, considerar o deslocamento linear do êmbolo ocasionado por uma volta do carretel sendo igual ao perímetro de um círculo e o deslocamento linear de duas voltas o perímetro de dois círculos com diâmetros diferentes, seria aceitável e causaria um erro pequeno. Isto estaria correto se não fosse a existência do ponto de partida do cabo de aço, que ao finalizar a primeira volta faz com que o fio suba para começar a segunda volta, o erro causado por esta subida

é desconhecido e poderá causar um aumento da velocidade de extrusão para a segunda volta, já que um comprimento maior do que o esperado de cabo será enrolado.

Para solucionar este problema, foi idealizado um carretel bipartido no qual o cabo entraria tangente ao núcleo, sendo este ponto de entrada parte de uma curva espiral. Observa-se na Figura 37, as duas partes do carretel desmontadas (a e b), o macho do carretel com o cabo de aço enrolado (c) e o conjunto montado (d). No macho do carretel é ilustrado em vermelho o ponto de referência para se conhecer onde começa a primeira volta, em amarelo tem-se a face que faz o apoio da parte fêmea do carretel, evitando que o cabo seja esmagado e garantindo um vão de 1mm no interior do carretel, em azul tem-se a face tangente ao cabo.

Esta geometria foi desenhada para que o vão fosse compatível com um cabo de aço de 1 mm de diâmetro e também fizesse com que o cabo enrolasse formando uma espiral. O enrolamento em espiral permite que o comprimento de cabo enrolado seja conhecido, tornando possível o correto controle de velocidade do deslocamento linear do êmbolo.

A espiral demonstrada na Figura 38 tem seu comprimento obtido pela equação 1 abaixo:

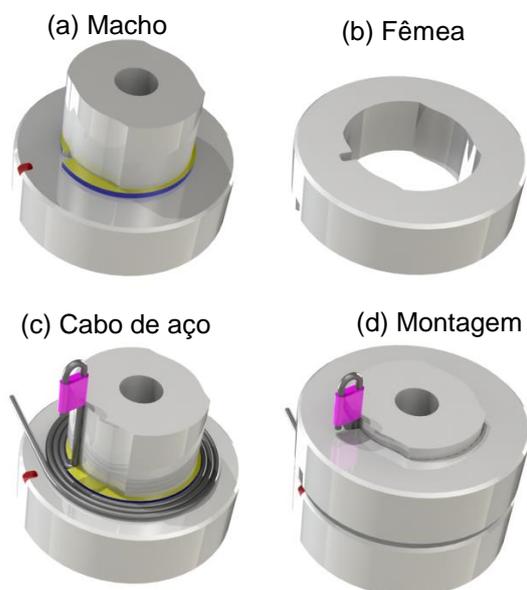
$$C = \int_0^{n\pi} \sqrt{\left(r + \frac{\theta}{2\pi}\right)^2 + \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2} d\theta \quad (1)$$

Em que:

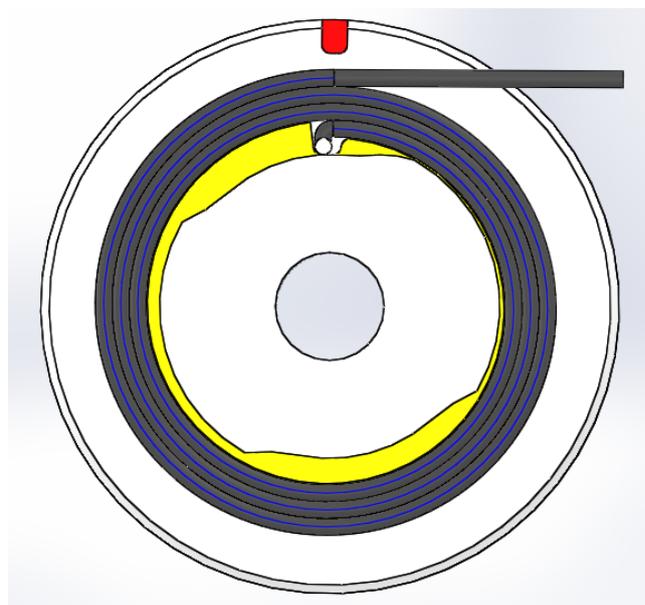
C: comprimento enrolado (mm)

n: número de voltas em radianos (1 volta =  $2\pi$ )

r: raio da primeira volta (mm)



**Figura 37 – Carretel**  
Fonte: Autoria própria.

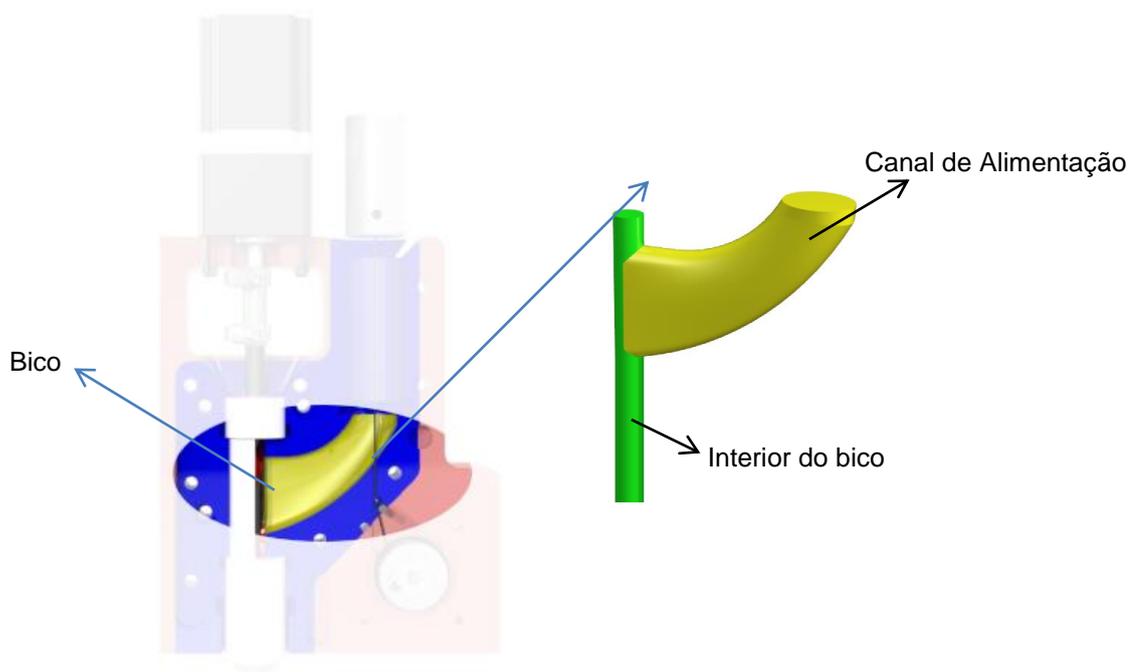


**Figura 38 – Espiral do carretel**  
Fonte: Autoria própria.

Para o cabeçote, o deslocamento linear do êmbolo deveria ser de no mínimo 90mm. Substituindo na equação 2, chegou-se a conclusão de que 1,5 voltas ( $3\pi$ ), corresponderia a um comprimento de 106,039 mm, comprimento aceitável visto que no momento da alimentação o êmbolo deveria ficar totalmente fora do cilindro, para não atrapalhar.

$$C = \int_0^{3\pi} \sqrt{\left(10.5 + \frac{\theta}{2\pi}\right)^2 + \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2} d\theta = 106,039mm \quad (2)$$

#### 4.1.3.3 Canal de alimentação

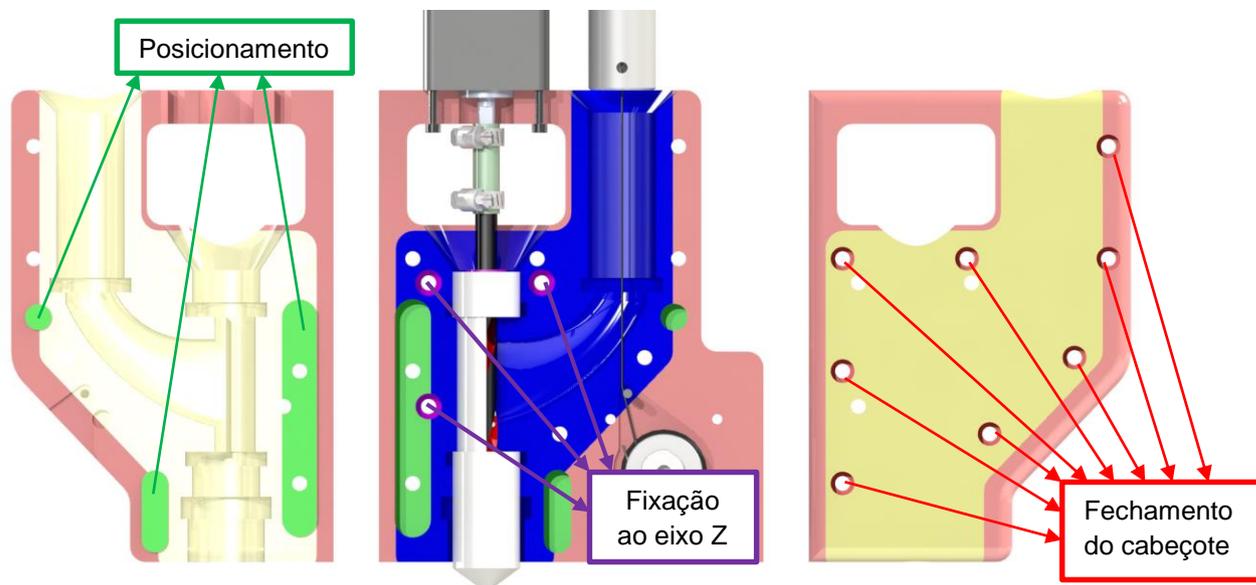


**Figura 39 – Canal de alimentação**  
**Fonte: Autoria própria.**

A geometria observada na Figura 39 representa o canal de alimentação. Esta seção foi projetada para ser suave, mantendo sempre a mesma área de seção transversal em todos os pontos do canal, de forma a não influenciar negativamente na força solicitada do motor do êmbolo durante o processo de extrusão.

#### 4.1.3.4 Posicionamento e fixação

Na Figura 40 está destacado em verde o método adotado para posicionar as duas metades do cabeçote, sendo três conjuntos macho/cavidade com 0,1mm de folga que atuam evitando que haja um fechamento incorreto das peças. Em vermelho é possível notar os oito rebaixos para os parafusos allen M6 que fixam as duas metades e em lilás tem-se os rebaixos para os três parafusos allen M6 que fixam o cabeçote ao eixo Z mesa de coordenadas XYZ.



**Figura 40 – Posicionamento e fixação**  
 Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.4 Escolha da matéria-prima dos itens a ser fabricados

A escolha da matéria-prima utilizada para fabricar as peças do cabeçote foi baseada no material disponível no NUFER.

##### 4.1.4.1 Material para o corpo do cabeçote

O corpo do cabeçote consistirá em um corpo bipartido responsável por integrar todas as partes do cabeçote, ou seja, comportará os motores, o caminho da massa cerâmica até o bico, o carretel, o êmbolo alimentador, a rosca transportadora e o bico extrusor. Sendo este o elemento mais importante do cabeçote, o material de que será feito deve apresentar boa usinabilidade e boa resistência mecânica e química, permitindo um bom acabamento e não reagindo quimicamente com a massa cerâmica.

Em outro projeto realizado junto ao NUFER foram adquiridas chapas de RenShape 460 e RenShape 5166, materiais utilizados para fabricação de modelos protótipo e criação de ferramental rápido. A Figura 41 ilustra o bloco de RenShape 460 disponível no NUFER. As propriedades mecânicas deste material podem ser verificadas no capítulo 2.1.

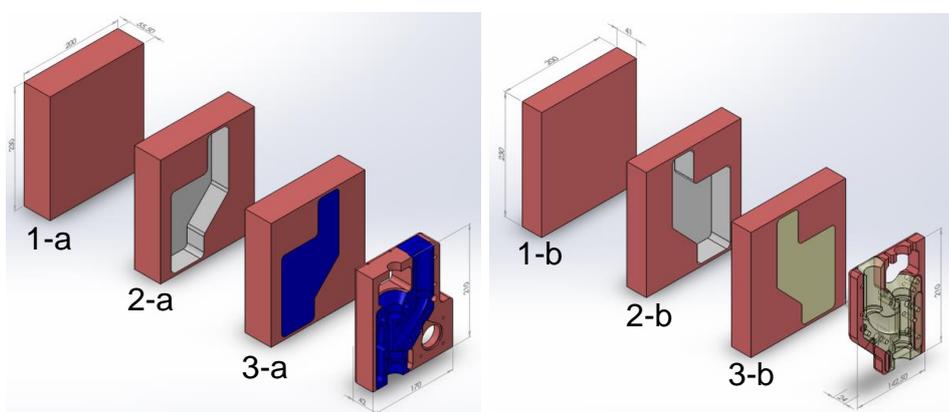


**Figura 41 – Bloco de RenShape 460**  
Fonte: Autoria própria.

Embora muito utilizado por apresentar excelente usinabilidade o RenShape 460 é também um material higroscópico, ou seja, possui a propriedade de absorver água. Esta característica o tornaria inviável para tal uso, já que a massa cerâmica a ser processada teria contato direto com o RenShape e assim iria perder líquido. Já o RenShape 5166 seria ideal para o projeto por apresentar uma higroscopia baixa e uma alta resistência a abrasão, mas infelizmente não havia quantidade de material suficiente para fabricar o corpo do cabeçote inteiro. Com isso foram estudadas soluções para viabilizar o uso do RenShape 460.

Uma das soluções encontradas para tornar possível o emprego do RenShape 460 como matéria-prima para construção do cabeçote, seria a mescla com um segundo material que contemplaria as áreas onde houvesse contato direto com a massa cerâmica.

O laboratório de materiais da UTFPR, cedeu para o projeto dois litros de resina epóxi Bisfenol A. A quantidade de resina doada não foi suficiente para fabricar o cabeçote inteiro, mas resolveu o problema de absorção apresentado pelo RenShape 460. A resina possibilitou a criação de um bloco de matéria-prima específico para este projeto. Na Figura 42 é possível observar como foi feita a mesclagem da resina epóxi com o RenShape 460.



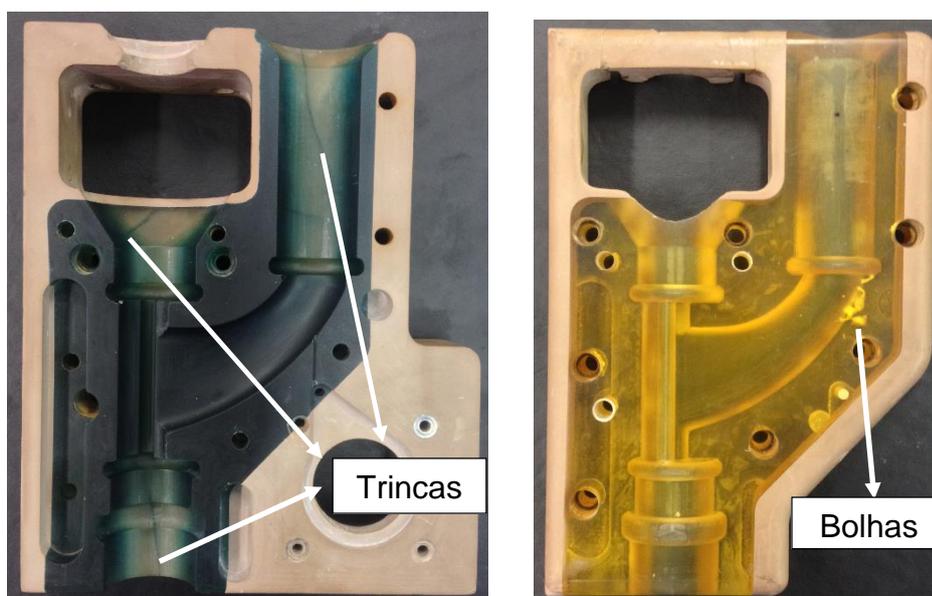
**Figura 42 – Matéria-prima para fabricação do corpo do cabeçote**  
**Fonte: Autoria própria.**

O preparo da matéria-prima para fabricação do corpo do cabeçote ocorreu em 3 etapas.

- ETAPA 1: Preparo dos blocos de RenShape 460 com as dimensões necessárias para fabricar os modelos, prevendo possíveis erros de posicionamento e outras eventualidades no processo de usinagem, conforme apontado em 1-a e 1-b da Figura 42. Para isto foram cortados blocos com dimensões maiores do que as dos modelos finais, o bloco original de RenShape 460 possuía 600x500x100mm, deste foi retirado um bloco menor de 230x200x100mm que foi cortado em dois pedaços menores um com 230x200x55.5mm e outro com 230x200x41mm, que originariam as duas metades do cabeçote.
- ETAPA 2: Usinagem das cavidades que irão receber o epóxi, ilustrado em 2-a e 2-b da Figura 42. Nesta etapa foi definida a geometria ideal para receber epóxi, sendo dada prioridade às áreas onde ocorrerão esforços mecânicos maiores, que não podem ter contato com materiais

úmidos e regiões em que um material translúcido fosse útil permitindo a visão de dentro do cabeçote.

- ETAPA 3: Preenchimento da cavidade com a resina epóxi, demonstrado em 3-a e 3-b da Figura 42. Nesta etapa, o epóxi líquido foi misturado com seu catalizador na proporção recomendada pelo fabricante. Esta etapa foi realizada em duas partes de modo a evitar que houvessem trincas, devido a espessura do bloco de epóxi. Foi feito dois preenchimentos de 21mm de espessura, mas mesmo com este cuidado houve o surgimento de trincas e bolhas (Figura 43), decorrentes da ausência de um vibrador para retirar o ar da resina. Ambos os defeitos não prejudicaram a utilização nos blocos para fabricação do cabeçote. A primeira cavidade foi preenchida com epóxi com pigmento azul e houveram trincas no primeiro preenchimento de 21mm, o segundo preenchimento não teve trincas, viabilizando a utilização do bloco. Na segunda cavidade foi preenchida com epóxi sem pigmento, deixando o bloco translúcido e houve o surgimento de bolhas que foram preenchidas com epóxi após a usinagem.



**Figura 43- Falhas ocorridas no material epóxi**  
**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.1.4.2 Material para o êmbolo

O êmbolo é o elemento que irá percorrer o cilindro de alimentação empurrando a massa cerâmica em direção a rosca transportadora. O material ideal para esta tarefa deve possuir um baixo coeficiente de atrito e boa resistência mecânica. Os materiais estudados para esta função são o alumínio ASTM 6153 e o teflon com carga de grafite descrito no item 2.3.6 que possui um baixíssimo coeficiente de atrito.

Foi decidido utilizar primeiramente o alumínio ASTM 6153 disponível na UTFPR e caso ele não funcionasse corretamente seria adquirido o teflon grafitado para fabricação do elemento. O tarugo cedido pela universidade é ilustrado na Figura 44.

#### 4.1.4.3 Material para o bico

O bico é o elemento responsável por extrudar a massa cerâmica. Este componente deve apresentar uma boa resistência à abrasão e pressão, para que não aumente o diâmetro do furo de saída devido ao atrito com a cerâmica sob pressão.

O material disponível que apresentou as melhores características mecânicas para este trabalho foi o alumínio ASTM 6153, mostrado na Figura 44, fornecido pela UTFPR.



**Figura 44 – Tarugo de alumínio cedido pela UTFPR  
Fonte: Autoria própria.**

#### 4.1.4.4 Cabo de aço e fixação

Para puxar o êmbolo responsável por empurrar a massa cerâmica, foi utilizado um cabo de aço. Para este trabalho o cabo deve possuir uma boa resistência a tração.

Este componente também atua como “componente de sacrifício”, o qual deve estourar caso a pressão no interior do cabeçote seja muito grande, evitando em que elementos mais caros e de difícil fabricação sejam afetados.

A Figura 45 ilustra o cabo de aço escolhido, é um modelo revestido com nylon, muito utilizado para pesca e suporta até 500N de força de tração.

Para fixação do cabo ao êmbolo e ao carretel, foram utilizadas anilhas metálicas, mostradas na Figura 46.



Figura 45 – Cabo de aço  
Fonte: Autoria própria.



Figura 46 – Anilhas p/ fixação do cabo de aço  
Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.4.5 Rosca transportadora

Devido ao tempo de projeto e ao custo de uma rosca transportadora ideal para processar o material cerâmico, optou-se por adequar elementos que possuíssem a característica de transportar material.

Vários elementos foram analisados e dois foram testados para a função, são eles: parafuso comum de rosca com passo longo e uma broca de aço rápido ilustrada na Figura 47.

O parafuso foi testado, mas não obteve resultados na função de rosca transportadora. Enquanto a broca quando girada no sentido contrário ao usual de corte, faz com que seus canais extratores de cavaco funcionem como condutores de

material, empurrando o material para frente ao invés de para trás como em um processo usual de usinagem.

Com o resultado deste teste, chegou-se à conclusão de utilizar uma broca de aço rápido com as seguintes características como rosca transportadora:

- Diâmetro: 10mm
- Comprimento Útil: 121mm
- Comprimento Total: 184mm



**Figura 47 – Broca de aço rápido de 10mm**  
Fonte: Autoria própria.

#### **4.1.4.6 Acoplamento da rosca transportadora**

Embora não tenha sido encontrado na literatura referências sobre o uso de mangueiras para realizar o acoplamento entre eixos, existe um grande número de hobbistas que vem utilizando este elemento na construção de máquinas CNC, um exemplo pode ser observado na Figura 48 em que uma mangueira é utilizada para transmitir torque à um fuso de uma fresadora CNC.



**Figura 48 – Uso de mangueira como acoplamento**

Fonte: <http://eletromaniacos.com/modules.php?name=News&file=article&sid=63>

Visto que esta solução representa uma grande economia no desenvolvimento do cabeçote, foi decidido testá-la.

#### **4.1.4.7 Material para o carretel**

O carretel é o elemento que enrolará o cabo de aço. Este componente terá uma geometria complexa e sofrerá uma grande solicitação mecânica. Os materiais sugeridos para este elemento são alumínio ASTM 5166 e RenShape 5166.

Entre os dois materiais foi escolhido o RenShape 5166, ilustrado na Figura 49, que possui uma boa usinabilidade e permite que o elemento seja fabricado na máquina Roland MDX-40 disponível no NUFER, ao contrário do alumínio que requer um centro de usinagem para ser processado, o que não estava disponível para utilização na UTFPR no momento.



Figura 49 – Bloco de RenShape 5166 disponível no NUFER  
Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.5 Planejamento de processo, fabricação e montagem

O planejamento do processo de usinagem das peças a serem fabricadas na UTFPR foi feito com o auxílio do programa CAM (*Computer-aided manufacturing*) PowerMill desenvolvido pela empresa Delcam. Abaixo são mostradas na Figura 50 algumas imagens do planejamento do processo feitos no PowerMill.

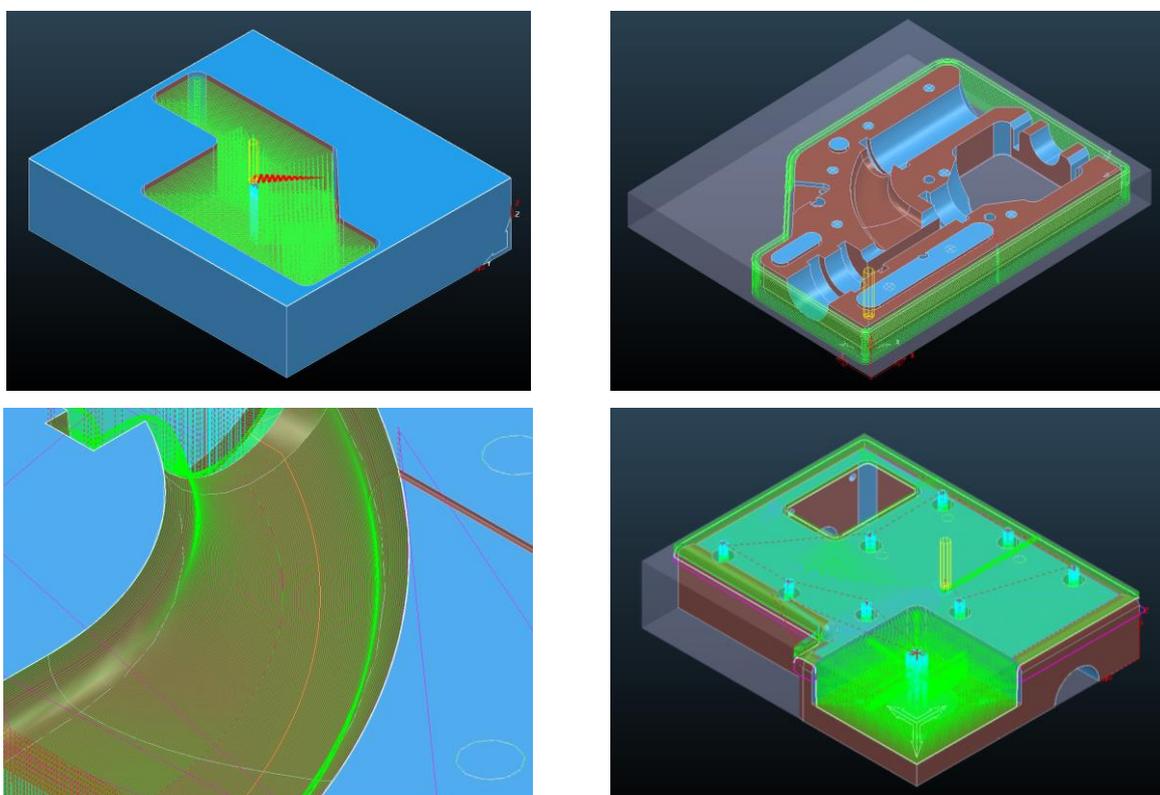


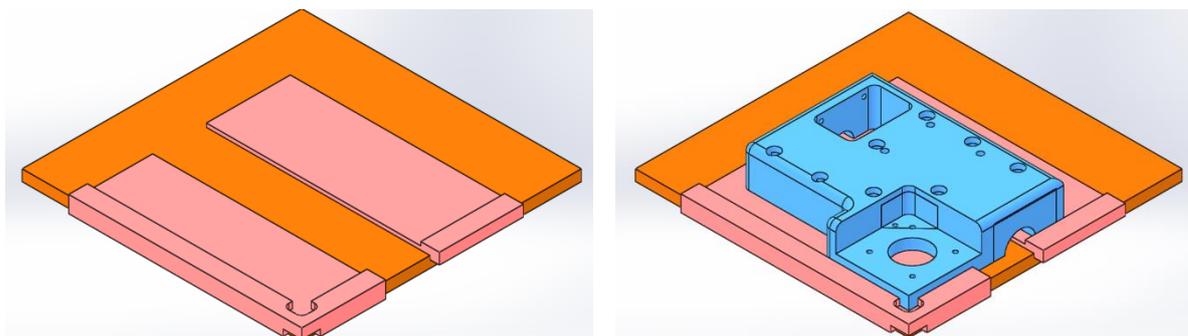
Figura 50 – Planejamento do processo de usinagem  
Fonte: Autoria própria.

As peças do cabeçote foram fabricadas em uma máquina fresadora CNC Roland MDX-40 ilustrada na Figura 51, disponível no NUFER.



**Figura 51 – Roland MDX 40**  
**Fonte: Autoria própria.**

Algumas peças necessitam processo de usinagem em ambos os lados, mas como esta máquina não está preparada para reposicionamento de peças, foi desenvolvido um gabarito para a máquina, permitindo a obtenção das referências necessárias para o reposicionamento, como demonstrado na Figura 52.



**Figura 52 – Gabarito para posicionamento**  
**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.1.6 Escolha e ajuste dos componentes padrão

##### 4.1.6.1 Motores e drives

A escolha dos motores a serem utilizados na rosca transportadora e no carretel foi feita levando em conta os requisitos mecânicos e eletrônicos que os motores deverão atender e também no que há disponível no NUFER.

Os motores utilizados nestas funções devem possibilitar o controle de velocidade com precisão e possuir torque suficiente para atuar no processo de extrusão.

No NUFER existem alguns modelos de motores utilizados em projetos anteriores que atendem aos requisitos. São dois motores de passo que possuem a possibilidade de ligação bipolar. Um dos motores é da marca Akiyama Automação e modelo AK57H/3G20-1.8 mostrado na Figura 53, este motor possui resolução de 200 passos/revolução, torque de 15kgf.cm (conexão bipolar) e tem acoplado ao seu eixo uma caixa de redução de 1:20 que aumenta o torque para 300kgf.cm e aumenta a resolução mecânica para 4000 passos/revolução, sendo ideal para operar a rosca transportadora, mais informações sobre este motor podem ser verificadas no ANEXO C. O outro motor é um motor híbrido NEMA23 da marca MAE e modelo HY200–2240–0240–AC04 mostrado na Figura 54, apresenta um torque intermediário suficiente para atuar na alimentação da rosca transportadora puxando o êmbolo, suas características são relacionadas abaixo:

- HY = Motor híbrido, com rotor de baixa inércia
- 200 = resolução (200 passos/revolução)
- 22 = Carcaça NEMA 23
- 40 = comprimento 4" (101,6mm)
- 0240 = 2,4A de corrente por fase
- A = eixo simples
- C = Fora de catálogo
- 04 = quantidade de fios (conexão bipolar)

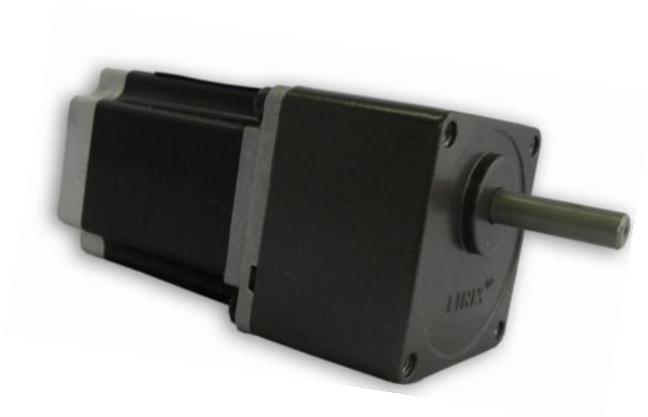


Figura 53 – Motor com caixa de redução  
Fonte: Autoria própria.

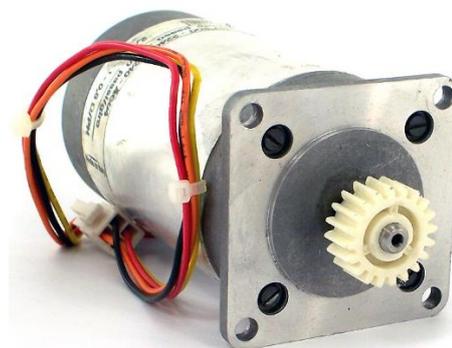


Figura 54 – Motor sem caixa de redução  
Fonte: Autoria própria.

O acionamento destes motores será feito com *drivers* de micropasso alimentados por fontes chaveadas disponíveis no NUFER, elementos da Figura 55 e Figura 56.

Os *drivers* possuem resolução de até 256 micropassos por passo, totalizando para um motor de 200 passos, um total de 51200 micropassos por revolução, possuem também ajuste de corrente e serão alimentados por fontes de 300W RMS que possuem 68Vdc de saída (recomendado pelo fabricante do *driver*), conforme verificado na folha de dados encontrada no ANEXO B.



Figura 55 – Fonte chaveada  
Fonte: Autoria própria.



Figura 56 – Driver de micropasso  
Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.6.2 Componentes de controle

Para o controle da velocidade angular do carretel e da rosca transportadora, optou-se por utilizar dois Arduinos disponíveis no NUFER, sendo ambos do modelo Arduino Uno ilustrado na Figura 57. Cada Arduino será empregado em uma função, ou seja, um na rosca transportadora e o outro no carretel, facilitando a programação e melhorando a confiabilidade do sistema, já que os dois motores devem trabalhar simultaneamente. Mais informações sobre este componente podem ser encontradas no item 2.3.1.



**Figura 57 – Arduino Uno**  
**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.1.7 Integração do controle do cabeçote com o código G

O programa de controle instalado na mesa XYZ é o EMC<sup>2</sup>, descrito no item 2.3.4. Este programa foi desenvolvido e otimizado para trabalhar com processos de usinagem e tem as saídas pré-definidas para tal tarefa.

Como, tanto o EMC<sup>2</sup> quanto os programas de manufatura aditiva trabalham com código G, resolveu-se adaptar o EMC<sup>2</sup> para trabalhar com manufatura aditiva, mas ao invés de ligar o eixo árvore que aciona a ferramenta de corte, o programa estaria atuando sobre o processo de extrusão, ou seja, ligando ou desligando o cabeçote de extrusão. Para isso bastou ligar as saídas do comando do eixo árvore (pino 8 e 9 da porta paralela) aos Arduinos controladores do cabeçote extrusor.

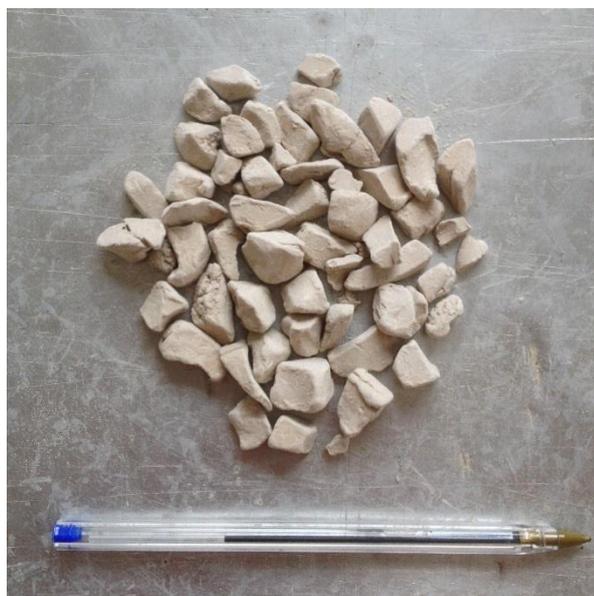
Por meio dos comandos M3 e M4 do código G que controlariam o eixo árvore de uma máquina de usinagem, é realizado o acionamento e desacionamento do cabeçote para AM.

#### 4.1.8 Definição da massa cerâmica a ser processada

A massa cerâmica escolhida para o teste foi a porcelana modelo 910-cone-6 da marca PSH, facilmente encontrada no mercado nacional. O motivo desta escolha foi o fato desta massa possuir a menor granulometria disponível nas lojas especializadas em cerâmicos de Curitiba, que segundo o fabricante, se a massa for dispersa em água suas partículas irão passar por uma peneira de malha 200 *Mesh*, que corresponde à uma malha com abertura de 0,074mm. A folha de dados deste material pode ser encontrada no ANEXO D.

Esta massa é utilizada em trabalhos de modelagem, portanto possui uma viscosidade muito alta. Na UTFPR campus Curitiba não foi encontrado um equipamento capaz de realizar a medição da viscosidade desta massa, portanto não foi possível mensurá-la.

Visto que a massa cerâmica escolhida é composta de 80% de materiais sólidos e de 20% de água, resolveu-se secar completamente a massa e então inserir quantidades conhecidas de água até se obter uma viscosidade aceitável para extrusão. Na Figura 58 tem-se a massa cerâmica completamente seca e pronta para ser moída. Não houve preocupação com a granulometria da cerâmica moída, pois por se tratar de um aglomerado de micro cristais de tamanhos inferiores a 0,074mm, as partículas tendem a se separar quando entrarem em contato com a água, tornando-se novamente uma massa cerâmica.



**Figura 58 – Massa cerâmica seca**  
**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.1.9 Controle do cabeçote

O controle empregado no cabeçote, consiste no controle de velocidade de extrusão. Basicamente é composto por um código C implementado no Arduino que gera pulsos com tempos conhecidos, estes pulsos são enviados aos *drivers* que comandam os motores de passo do cabeçote.

Como não se sabe quais as velocidades ideais para trabalho, foi feito um código flexível que permite a alteração do tempo dos pulsos via porta serial com o cabeçote em pleno funcionamento (APÊNDICE B e APÊNDICE C). Esta flexibilidade facilitou a tarefa de determinar a velocidade de extrusão e a eficiência da rosca transportadora.

O ajuste da configuração da corrente dos *drivers* de micropasso foram feitas seguindo as recomendações do fabricante configurando as chaves SW1, SW2 e SW3 dos *drivers*.

A corrente total dos motores foi obtida somando os valores de corrente de suas fases, com isso para o motor AK57H/3G20-1.8 que possui duas fases de 2.1A (conexão bipolar) o ajuste 4 da tabela 1 é o mais adequado. Para o motor HY200–

2240–0240–AC04 que possui duas fases de 2,4A, o ajuste 5 da Tabela 3 é o mais adequado.

**Tabela 3 – Ajuste de corrente dos motores de passo**

| Ajuste | Corrente Pico | SW1 | SW2 | SW3 |
|--------|---------------|-----|-----|-----|
| 1      | 2,40A         | ON  | ON  | ON  |
| 2      | 3,08A         | OFF | ON  | ON  |
| 3      | 3,77A         | ON  | OFF | ON  |
| 4      | 4,45A         | OFF | OFF | ON  |
| 5      | 5,14A         | ON  | ON  | OFF |
| 6      | 5,83A         | OFF | ON  | OFF |
| 7      | 6,52A         | ON  | OFF | OFF |
| 8      | 7,20A         | OFF | OFF | OFF |

Fonte: Anexo B.

O ajuste da resolução de micropassos foi feito seguindo as instruções do fabricante, mas sem chegar no limite de resolução do *driver*, que faria necessário a execução de 51.200 passos para uma revolução do eixo do motor, ou seja, 256 micropassos por passo do motor. A segunda melhor resolução que o *driver* pode atingir é de 40.000 passos/revolução, portanto esta opção foi a escolhida configurando as chaves SW5, SW6, SW7 e SW8 conforme o ajuste 2 da Tabela 4.

**Tabela 4 – Ajuste da resolução do driver**

| Ajuste | Micropasso Passos/Rev | Passos/Rev | SW5 | SW6 | SW7 | SW8 |
|--------|-----------------------|------------|-----|-----|-----|-----|
| 1      | 256                   | 51.200     | OFF | OFF | OFF | ON  |
| 2      | 200                   | 40.000     | OFF | OFF | OFF | OFF |

Fonte: Anexo B.

O número total de micropassos que o motor da rosca transportadora que deve executar para realizar uma revolução é decorrente da equação 3.

$$PPR = M \times D \times R = 200 \times 200 \times 20 = 800000 \text{ passos por revolução} \quad (3)$$

Onde:

PPR: Passos por revolução

M: Resolução do motor (passos)

D: Resolução do driver de micropasso (micropassos)

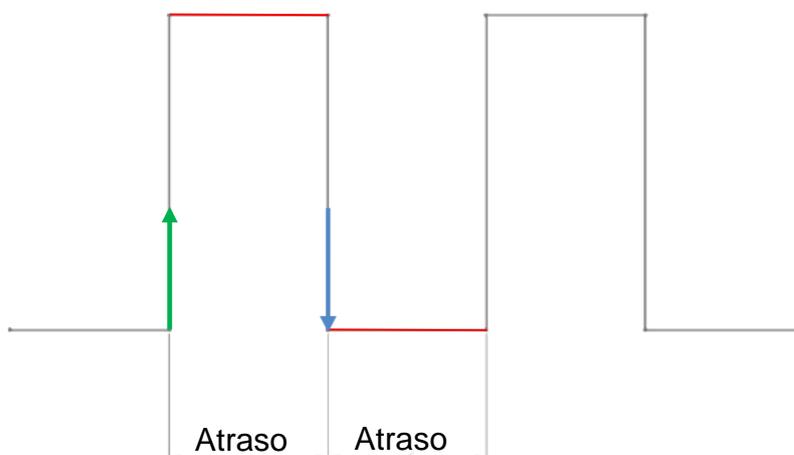
R: Redução do motor

O número total de micropassos que o motor do carretel deve executar para realizar uma revolução é decorrente da equação 4

$$PPR = M \times D = 200 \times 200 = 40000 \text{ passos por revolução} \quad (4)$$

O Arduino possui bibliotecas que geram atrasos (paradas no código). Estas bibliotecas podem trabalhar em milissegundos (biblioteca `delay( )`) ou em micro segundos (biblioteca `delayMicroseconds( )`).

As bibliotecas de atrasos aliadas com o a resolução do conjunto mecânico, são capazes de gerar velocidades muito baixas de rotação no eixo do motor. O controle da velocidade se dá pelo ajuste do período de uma onda quadrada (ilustrada na Figura 59) enviada aos *drivers* dos motores pelo o Arduino.



**Figura 59 – Pulsos de acionamento dos motores de passo**  
**Fonte: Autoria própria.**

Os passos do motor são efetivados apenas na borda de subida da onda quadrada, ilustrada na cor verde da Figura 59. Ao dar o pulso, o motor tem um deslocamento angular de seu eixo e mantém a posição durante os dois atrasos, sem que haja a perda do torque em seu eixo, isso acontece devido a configuração no drive de micropasso que permite que o motor seja mantido energizado com corrente máxima, mesmo quando em repouso.

A viscosidade da massa cerâmica rege o tempo dos atrasos, um tempo muito pequeno para uma massa muito viscosa, implicaria em uma grande velocidade de extrusão, que pode ser incompatível com o escoamento da massa cerâmica podendo elevar a pressão dentro do sistema e causar o rompimento do cabo de aço. Por ser característica da massa cerâmica empregada e não do cabeçote, o estudo do tempo ideal para estes atrasos não faz parte do escopo deste trabalho. Foram feitos testes que definiram este tempo tanto para o motor da rosca transportadora quanto para o motor do carretel. O tempo do atraso no motor do carretel foi definido em 92ms (biblioteca `delay()`), com isso o período da onda quadrada é de 184ms e a frequência é igual a 5,43Hz. Para o motor da rosca transportadora o atraso foi definido em 15ms, fazendo uso da biblioteca `delayMicroseconds()`, com período de onda de 30ms e frequência de 33,33Hz.

Seguindo a equação 1 da espiral do carretel mostrada no item 4.1.3.2, na primeira volta tem-se que 69,12mm de cabo são enrolados e na segunda volta 75,40mm de cabo são enrolados, totalizando 144,52mm de cabo enrolado nas duas voltas, conforme verificado nas equações 5 e 6 abaixo.

$$\int_0^{2\pi} \sqrt{\left(10.5 + \frac{\theta}{2\pi}\right)^2 + \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2} d\theta = 69.12\text{mm} \quad (5)$$

$$\int_{2\pi}^{4\pi} \sqrt{\left(10.5 + \frac{\theta}{2\pi}\right)^2 + \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2} d\theta = 75,40\text{mm} \quad (6)$$

O comprimento de cabo enrolado durante as voltas do carretel comprova que a segunda volta enrola 6,28mm de cabo a mais do que na primeira, isto é, cerca de 9,0891% de comprimento contido na volta anterior. Portanto a velocidade da segunda volta corresponde a 109,0891% da velocidade da primeira volta, para que assim sejam obtidas velocidades de enrolamento iguais nas duas voltas. Matematicamente tem-se que o tempo do atraso tem que ser multiplicado por 1,090891 para a segunda volta, conforme mostrado nas equações 7 e 8, implementado no código C carregado no Arduino e detalhado na Tabela 5.

$$VL^1 = \frac{69.1223}{P \times PPR} = \frac{69.1223}{184(ms) \times 40000} = 0.0093916 \frac{mm}{s} \quad (7)$$

$$VL^2 = \frac{75.4049}{P \times 1.090891 \times PPR} = \frac{75.4049}{184(ms) \times 1.090891 \times 40000} = 0.0093916 \frac{mm}{s} \quad (8)$$

Sendo que:

VL<sup>1</sup> é a velocidade linear do êmbolo para primeira volta (mm/s)

VL<sup>2</sup> é a velocidade linear do êmbolo para segunda volta (mm/s)

P é o período da onda quadrada (ms)

PPR é número de passos por revolução

**Tabela 5 - Detalhamento do movimento do êmbolo**

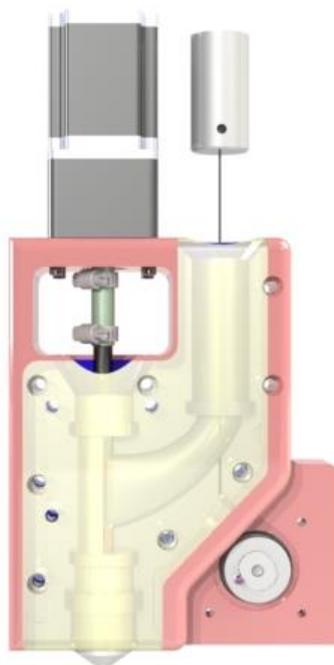
| Volta | INCREMENTO  | ATRASSO(ms) | PPR   | TR(s)   | TR(min) | CE(mm) | VL(mm/s)   |
|-------|-------------|-------------|-------|---------|---------|--------|------------|
| 1     | 1           | 92          | 40000 | 7360    | 122,67  | 69,12  | 0,00939162 |
| 2     | 1,090891073 | 100,36      | 40000 | 8028,96 | 133,86  | 75,40  | 0,00939162 |

Fonte: Autoria própria.

Em que, TR é o tempo gasto para realizar uma revolução, CE é o comprimento de cabo enrolado e VL é a velocidade linear do êmbolo.

## 4.2 TESTES DE EXTRUSÃO

Na Figura 60, pode-se observar a primeira versão do cabeçote completa, com todos os elementos montados.



**Figura 60 – Cabeçote completo**  
**Fonte: Autoria própria.**

Após a montagem do cabeçote, determinação de seus programas de controle e a definição dos materiais a serem processados foi feita a primeira bateria de testes.

Foram testadas várias misturas e analisado qualitativamente a continuidade do filamento gerado. As misturas que apresentaram melhores resultados estão descritas na Tabela 6.

**Tabela 6 – Misturas cerâmicas**

| <b>Elementos</b>                        | <b>Mistura A</b> | <b>Mistura B</b> | <b>Mistura C</b> |
|---|------------------|------------------|------------------|
| Porcelana (g)                           | 100              | 100              | 100              |
| Porcelana (%)                           | 68,49            | 67,57            | 66,67            |
| Água (g)                                | 46               | 48               | 50               |
| Água (%)                                | 31,51            | 32,43            | 33,33            |
| Massa total (g)                         | 146              | 148              | 150              |
| <b>Interrupções no filamento gerado</b> | Muitas           | Poucas           | Nenhuma          |

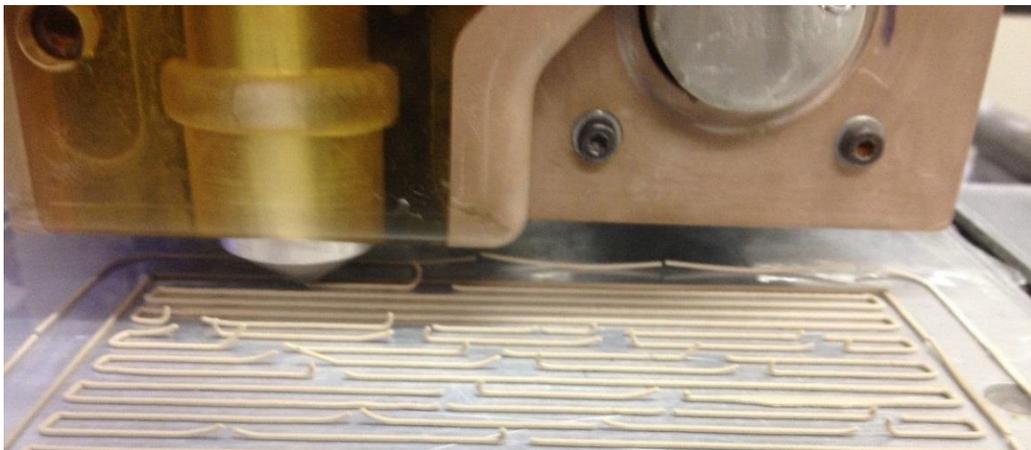
**Fonte: Autoria própria.**

Considerações sobre as misturas cerâmicas:

1. Mistura A:

- O aumento da velocidade da rosca transportadora não influenciou significativamente na velocidade de extrusão;
- O aumento da velocidade de descida do êmbolo tem influência direta na velocidade de extrusão. Mas ao parar a rosca transportadora esta velocidade diminui rapidamente.
- Obteve-se um filamento com interrupções, levando a crer que a massa estava muito seca e com baixa plasticidade;
- Quando o êmbolo chegou até a metade de seu curso, o cabo de aço rompeu, devido ao atrito do êmbolo com a parede do cilindro.

A Figura 61 demonstra as quebras dos filamentos devido as interrupções durante a extrusão.



**Figura 61 – Filamentos interrompidos**  
**Fonte: Autoria própria.**

2. Mistura B:

- O aumento da velocidade da rosca transportadora causou pequeno aumento na velocidade de extrusão;
- O aumento da velocidade de descida do êmbolo causou o mesmo efeito ocorrido na mistura A;
- Gerou um filamento mais contínuo, mas ainda com interrupções;

- Quando o êmbolo chegou até a metade de seu curso, o cabo de aço rompeu, devido ao atrito do êmbolo com a parede do cilindro.

### 3. Mistura C:

- O efeito do aumento da velocidade da rosca é notado de imediato, mas embora a velocidade de extrusão tenha aumentado significativamente, ainda é pequena tornando o processo lento e inviável;
- O aumento da velocidade de descida do êmbolo causou o aumento da velocidade de extrusão;
- Gerou um filamento contínuo, sem interrupções, ilustrado na Figura 62;
- Quando o êmbolo chegou até a metade de seu curso, o cabo de aço rompeu, devido ao atrito do êmbolo com a parede do cilindro.

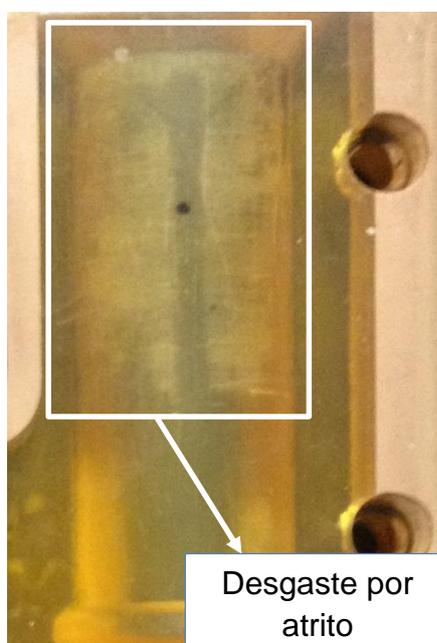


**Figura 62 – Filamento contínuo**  
**Fonte: Autoria própria.**

Analisando o desempenho do cabeçote e os resultados obtidos nos testes das misturas A, B e C pode-se concluir:

- a) Um pequeno aumento percentual de água na massa cerâmica representa uma grande variação de viscosidade;

- b) A geometria de uma broca comum não é eficiente para transporte de massa cerâmica;
- c) O transporte da massa cerâmica realizado pela pressão causada pelo êmbolo é eficiente quando combinado com a rosca, que auxilia no fluxo do material;
- d) A massa cerâmica que penetra entre o êmbolo e o cilindro causa um aumento de pressão e quanto mais o êmbolo avança no cilindro, maior é a área de atrito, até o momento que ocorre o rompimento do cabo. A Figura 63 ilustra a região onde ocorre o desgaste por atrito.

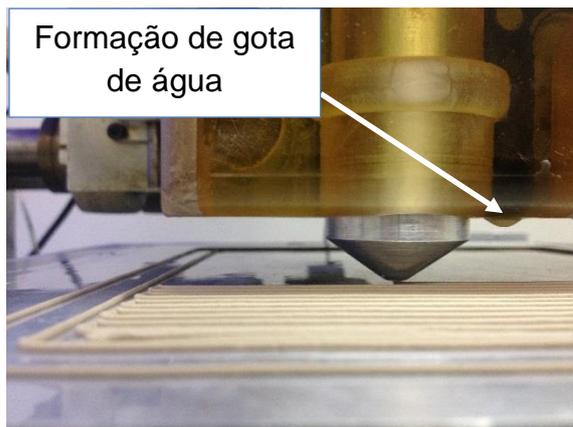


**Figura 63 – Desgaste causado pelo atrito**  
**Fonte: Autoria própria.**

- e) A área de seção transversal do cilindro é muito grande o que faz com que o motor do carretel tenha de girar a uma velocidade muito baixa, caso contrário a pressão no interior do cilindro sobe e rompe o cabo ou faz com que a velocidade extrusão seja muito alta devido à grande quantidade de material empurrado.
- f) A taxa de cisalhamento causada pela broca no material diminui sua viscosidade, facilitando o fluxo durante a extrusão. Quanto maior o cisalhamento do material menos viscoso ele ficará, a ponto de escorrer,

portanto é recomendável que esse cisalhamento aconteça no momento da extrusão de forma controlada.

- g) Houve exsudação da água presente na massa cerâmica, observada na Figura 64 e sua consequência no processo é mostrada na Figura 65.



**Figura 64 – Exsudação durante processo**  
Fonte: Autoria própria.



**Figura 65 – Falhas causadas pela exsudação**  
Fonte: Autoria própria.

### 4.3 MELHORIAS PROPOSTAS

A fim de melhorar os resultados na primeira bateria de testes algumas modificações foram implementadas:

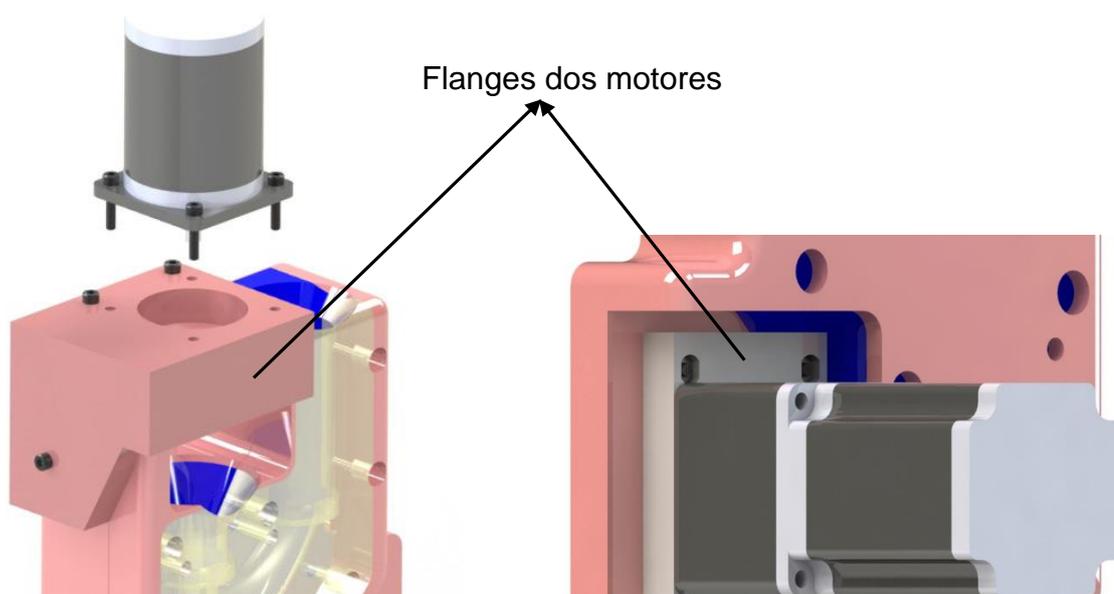
- A adoção do processo de extrusão por êmbolo, substituindo a rosca transportadora por uma pá agitadora que atuará diminuindo levemente a viscosidade da massa cerâmica auxiliando na deposição do material.
- A troca do motor que atua na rosca transportadora pelo motor que atua no carretel. Devido a existência da caixa de redução, será mais fácil o controle de velocidade do carretel e este motor proporcionaria um torque maior para puxar o êmbolo, caso seja necessário.
- A implementação de um conjunto bucha/êmbolo em teflon grafitado, com folga próxima a zero, para ser introduzido no cilindro de alimentação, a fim de diminuir a área da seção transversal e também para sanar o

problema do atrito e da subida de massa cerâmica entre as paredes dos elementos.

- A utilização de uma junta de borracha para diminuir o problema da exsudação de água.

#### 4.4 IMPLEMENTAÇÃO DAS MELHORIAS

Para trocar os motores de posição foi preciso criar duas flanges para adaptar às furações já existentes no corpo do cabeçote, já que o motor possui caixa de redução com eixo excêntrico. Os flanges podem ser observados na Figura 66.



**Figura 66 – Flanges para adaptação dos motores**  
Fonte: Autoria própria.

A broca utilizada como rosca transportadora teve seu corpo esmerilhado, com o intuito de diminuir seu diâmetro e utilizar sua ponta como pá agitadora. O resultado obtido é demonstrado na Figura 67.

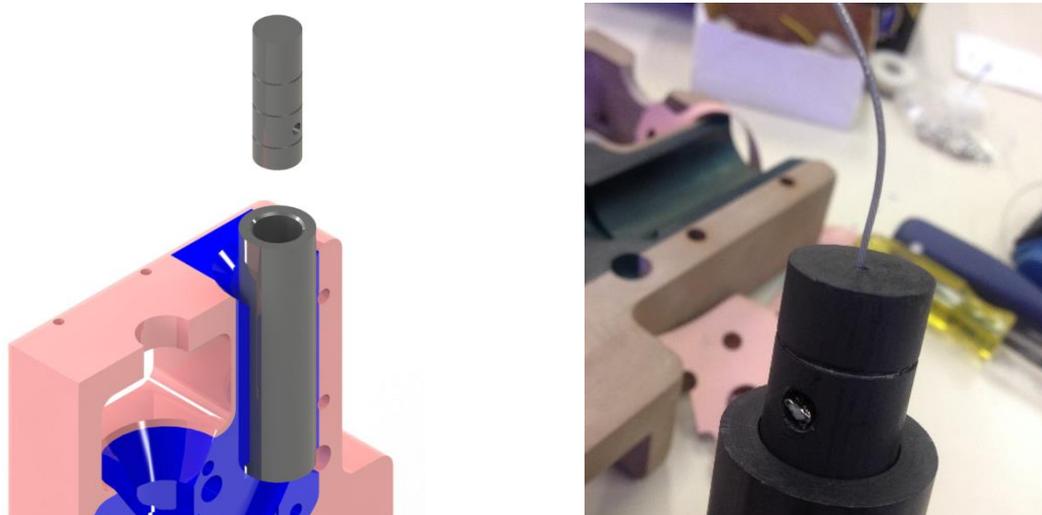


**Figura 67 – Pá agitadora**  
**Fonte: Autoria própria.**

A bucha para o cilindro de alimentação foi produzida em teflon grafitado e consiste em um tubo com diâmetro externo de 30mm e diâmetro interno de 19,2mm, com 109mm de altura, que reduz o volume útil para 31.558,68 milímetros cúbicos, que representa um cubo com aproximadamente 32mm de lado. Este novo cilindro permite velocidades mais altas de deslocamento do êmbolo, visto que a área da seção transversal é menor do que a projetada anteriormente.

O êmbolo foi fabricado em teflon grafitado de modo com que o encaixe com sua bucha teve ajuste deslizante e o meio de fixação com o cabo de aço foi feito com o mesmo sistema do êmbolo em alumínio, ou seja, utilizando anilhas de pressão.

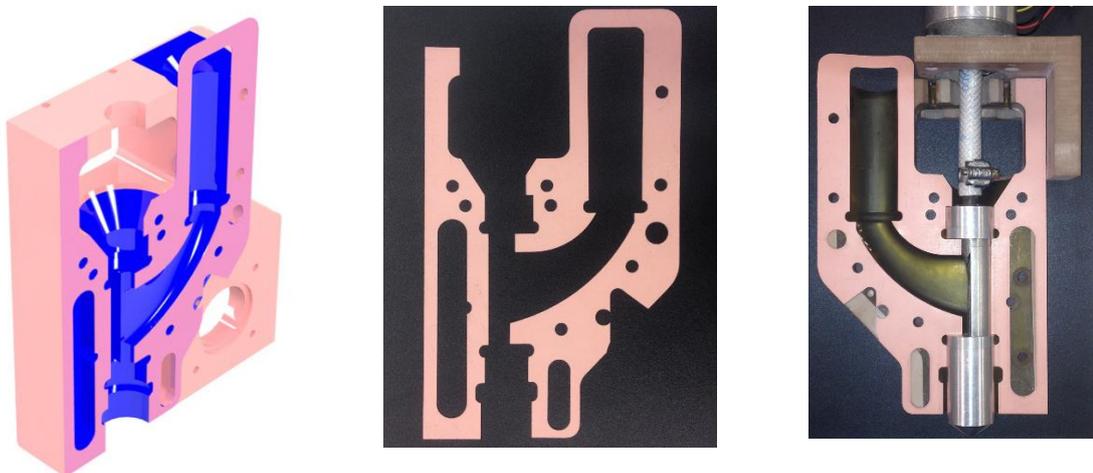
A bucha e o novo êmbolo podem ser observados na Figura 68.



**Figura 68 – Bucha e êmbolo fabricados em teflon grafitado**  
**Fonte: Autoria própria.**

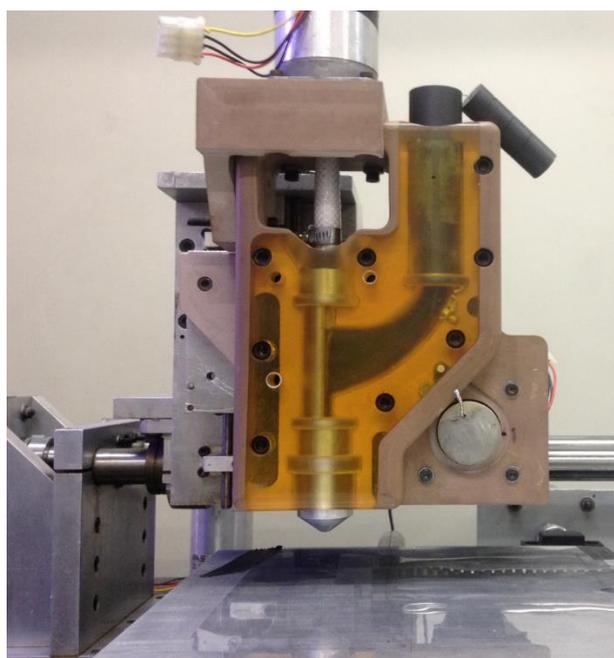
A junta demonstrada na Figura 69 foi feita utilizando um lençol de borracha de espessura 0,4mm e teve sua geometria recortada em uma máquina de corte a laser

LS100 da Gravograph, instalada no LITS (Laboratório de Inovação em Tecnologia e Sensores) da UFPR.



**Figura 69 – Junta de borracha**  
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 70 é mostrada a segunda versão do cabeçote com as melhorias implementadas.



**Figura 70 – Cabeçote com melhorias implantadas**  
Fonte: Autoria própria.

Devido à mudança na estratégia de funcionamento do cabeçote extrusor foi necessário alterar os tempos dos atrasos dos motores. O tempo do atraso no motor do carretel para primeira volta foi redefinido em 1400 $\mu$ s, com isso o período da onda quadrada é de 2,8ms e a frequência de acionamento foi de 357,1429Hz. Para o motor da pá agitadora foi definido o tempo do atraso em 250 $\mu$ s, com isso o período da onda quadrada é de 500 $\mu$ s e a frequência de acionamento em 2KHz. Estes tempos de atraso são possíveis pelo fato de serem dois Arduinos, pois como são tempos pequenos, se houvesse mais instruções no código C, possivelmente estes tempos seriam somados aos tempos das instruções, enviando aos *drivers* uma frequência incorreta. Nas equações 9 e 8 tem-se as velocidades ajustadas de descida do êmbolo para a primeira e segunda volta. Na Tabela 7 tem-se o detalhamento dos tempos.

$$v^1 = \frac{69.1223}{P \times PPR} = \frac{69.1223}{2800(\mu s) \times 800000} = 0.030858 \frac{mm}{s} \quad (9)$$

$$v^2 = \frac{75.4049}{P \times 1.090891 \times PPR} = \frac{75.4049}{2800(\mu s) \times 1.090891 \times 800000} = 0.030858 \frac{mm}{s} \quad (10)$$

**Tabela 7 - Detalhamento do movimento do êmbolo após alterado**

| Volta | INCREMENTO  | ATRASSO( $\mu$ s) | PPR    | TR(s)   | TR(min) | CE(mm) | VL(mm/s)   |
|-------|-------------|-------------------|--------|---------|---------|--------|------------|
| 1     | 1           | 1400              | 800000 | 2240    | 37,33   | 69,12  | 0,03085817 |
| 2     | 1,090891073 | 1527              | 800000 | 2443,60 | 40,73   | 75,40  | 0,03085817 |

Fonte: Autoria própria.

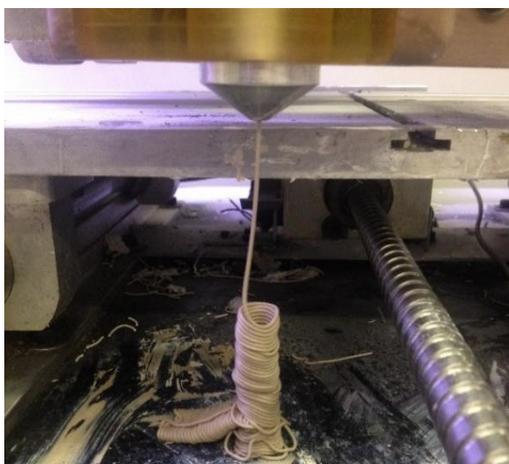
Em que, PPR é o número de passos por revolução, TR é o tempo gasto para realizar uma revolução, CE é comprimento de cabo enrolado e VL é a velocidade linear do êmbolo.

## 5 VALIDAÇÃO DO CABEÇOTE E ANÁLISE DOS RESULTADOS

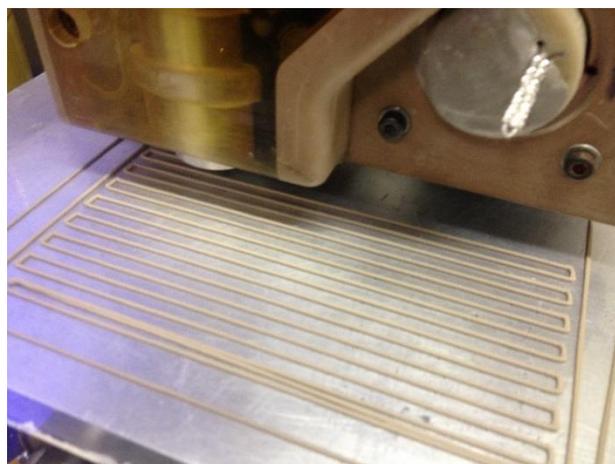
Após a implementação das melhorias propostas, foi realizado a segunda bateria de testes de extrusão. A massa cerâmica escolhida para alimentar o cabeçote foi a mistura C descrita na Tabela 6, presente no item 4.2. Esta massa apresentou o melhor resultado na primeira bateria de testes, sendo portanto a mais promissora a ser utilizada na continuidade da pesquisa.

A Figura 71, ilustra como foi feito o teste de continuidade do filamento, o cabeçote foi posicionado em uma região fora da área de trabalho da mesa de coordenadas e então acionado, extrudando a massa cerâmica com os motores configurados a trabalhar conforme explicado no item 4.4.

Na Figura 72 é demonstrado a capacidade de deposição de massa cerâmica com velocidade de deslocamento do cabeçote de 9mm/s.



**Figura 71 – Teste de continuidade do filamento**  
Fonte: Autoria própria.

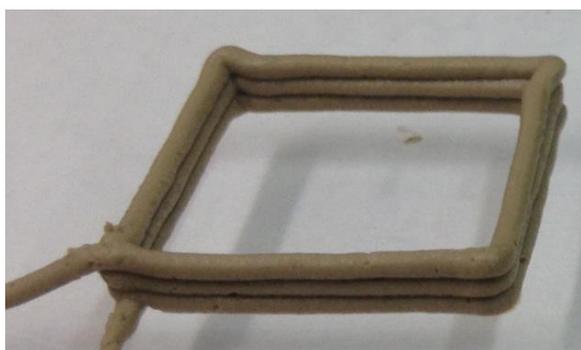


**Figura 72 – Teste de deposição**  
Fonte: Autoria própria.

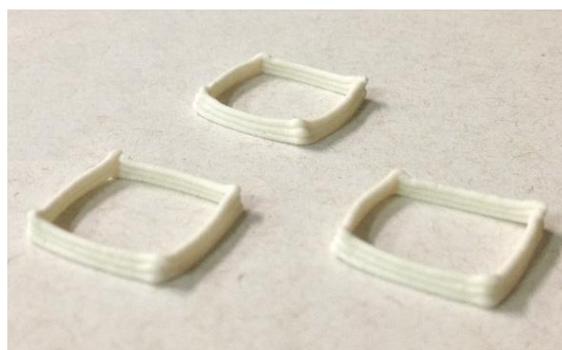
Foram realizados 5 testes de continuidade do filamento e não foram constatadas interrupções no filamento durante a extrusão de todo volume de massa cerâmica presente no cilindro de alimentação. O cilindro de teflon grafitado possui capacidade de 31.558,68 milímetros cúbicos de massa cerâmica, que corresponde a cerca de 73 gramas de massa. Volume processado integralmente durante aproximadamente 58,87 minutos. O que mostra a eficiência da espiral do carretel no

auxílio do controle de velocidade e prova que o cabeçote é capaz de gerar um filamento contínuo.

Para validar o cabeçote como um dispositivo que pode ser utilizado para trabalhar na manufatura aditiva foi feito um ensaio de deposição realizando o empilhamento de camadas de uma geometria simples. Para isto foi criada uma trajetória quadrada (17mmx17mm) em código G (APÊNDICE D) que empilha três camadas com altura de 1mm do filamento de massa cerâmica. Na Figura 73 tem-se a peça verde exposta logo após sua construção e na Figura 74 tem-se as peças após serem levadas ao forno.



**Figura 73 - Peça verde**  
**Fonte: Aatoria própria.**



**Figura 74 - Peça após queima**  
**Fonte: Aatoria própria.**

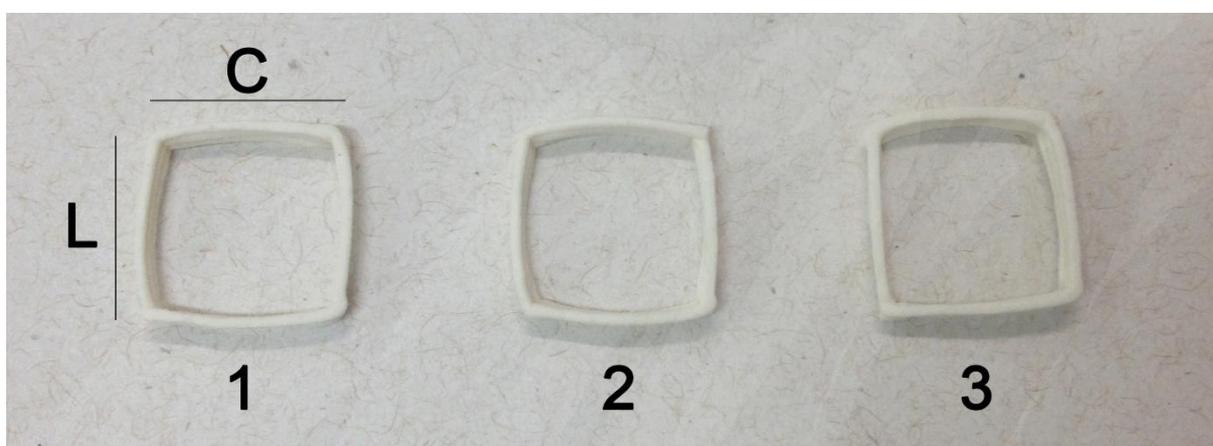
Como visto no item 2.1, a secagem é extremamente importante e influencia no dimensional de uma peça cerâmica. Se a secagem for rápida a peça sofrerá uma grande retração que poderá causar empenamento. Outro parâmetro que influencia no dimensional de uma peça cerâmica é a rampa de subida da temperatura no forno. Quanto mais suave for esta rampa, menor a probabilidade da peça trincar ou empenar.

Embora não faça parte do escopo deste trabalho, foi feita a análise dimensional de três peças submetidas a condições ruins de pós processamento, que são a secagem rápida da cerâmica verde e a subida rápida da temperatura do forno no momento da queima. Isso foi feito para verificar se sofreriam trincas.

As peças observadas na Figura 75 não tiveram controle no processo de secagem, secaram na temperatura ambiente em um dia de baixa umidade relativa do ar, com isso sofreram empenamento durante a secagem. Após a secagem foram

submetidas a uma temperatura de 1200°C em uma mufla Thermolab M.L.E.A.T, ilustrada na Figura 76, disponibilizada pelo Laboratório de Materiais e Modelos (LMM) da UTFPR. Este modelo da mufla não possui ajuste de velocidade aquecimento, ou seja, o controle consiste em um termostato que ao chegar em 1200°C desliga as resistências de aquecimento, isto prejudicou as características dimensionais da peça.

Mesmo com a ausência do controle de secagem e de rampa de subida de temperatura no pós-processamento as peças não sofreram trincas, apenas distorções dimensionais foram observadas, o que já era esperado.



**Figura 75 – Amostras de peças cerâmica produzidas pelo cabeçote**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 76 – Mufla Thermolab**  
**Fonte: Autoria própria.**

Como pode ser observado na Tabela 8, a variação dimensional de largura e comprimento da peça fabricada ficou em  $10\% \pm 1$  em relação à peça projetada. Já na altura e na espessura do filamento todas as amostras apresentaram a mesma variação.

**Tabela 8- Análise dimensional das amostras obtidas**

| AMOSTRAS | COMPRIMENTO (C) | LARGURA (L) | ALTURA | LARGURA FILAMENTO | VARIAÇÃO COMPRIMENTO (%) | VARIAÇÃO LARGURA (%) |
|----------|-----------------|-------------|--------|-------------------|--------------------------|----------------------|
| A        | 15,3            | 15,4        | 2,2    | 0,8               | 10,00                    | 9,41                 |
| B        | 15,1            | 15,4        | 2,2    | 0,8               | 11,18                    | 9,41                 |
| C        | 15,2            | 15,3        | 2,2    | 0,8               | 10,59                    | 10,00                |

**Fonte: Autoria própria.**

O orçamento para execução deste trabalho foi baixo, tendo como custo apenas os elementos fabricados em teflon grafitado e os parafusos de fixação, que somaram um total de R\$185,00. O restante dos elementos, materiais e serviços foram disponibilizados pela UTFPR e pela UFPR.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tecnologia desempenha um papel cada vez mais importante na sociedade, e o desenvolvimento da Manufatura Aditiva (AM) tem colaborado em diversos campos da ciência.

No Brasil a AM é pouco explorada e trabalhos como este ajudam a abrir horizontes para o emprego desta técnica na área de cerâmicos. Em outros países a AM vem sendo utilizada em vários setores, auxiliando no processo de desenvolvimento de novos produtos de diversos materiais, tais como: polímeros, metais e cerâmicos.

O uso de materiais reaproveitáveis aliado com a parceria de outros laboratórios e universidades garantiu que o projeto fosse desempenhado com baixo custo, sendo necessária a compra de matéria-prima para fabricação de apenas dois componentes e dos elementos de fixação. O emprego destes materiais alternativos, causaram algumas dificuldades no projeto que poderiam ter sido evitadas se houvesse disponibilidade de materiais mais apropriados para as funções.

O cabeçote desenvolvido atende aos requisitos da Tabela 2, sendo fácil de montar e desmontar. Seu sistema de posicionamento obteve sucesso garantindo que todas as partes funcionassem corretamente. Por ter corpo bipartido o processo de limpeza das partes que tiveram contato com a cerâmica foi fácil, bastando mergulhá-las em água. O sistema é robusto, suportou bem todos os testes, até mesmo os que superaram a força máxima resistida pelo cabo de aço. No requisito flexibilidade, não houve dificuldades em alterar as posições dos elementos, já que a primeira versão apresentava geometria com vários pontos de referência. Todas as partes do cabeçote, exceto as de teflon grafitado foram fabricadas com o maquinário da UTFPR.

O cabeçote utilizado para realizar os primeiros testes não apresentou bons resultados, devido a ineficiência da broca como rosca transportadora. Após a implementação das melhorias, o cabeçote funcionou corretamente, apresentando facilidade em extrudar a massa cerâmica testada.

O sistema de extrusão por êmbolo apresentou resultados satisfatórios, mas não funcionaria tão bem se não houvesse uma pá agitadora cisalhando o material e aumentando sua fluidez durante o processo de extrusão.

O estudo de extrusão objetivou conhecer a eficiência do cabeçote no processamento de massa cerâmica. Para tal, foram definidos parâmetros para ensaiar um tipo específico de massa cerâmica, com o qual foi obtido um filamento contínuo durante todo o volume de massa cerâmica alimentado, contudo a eficiência do cabeçote poderá ter mudanças quando usado para processar outras massas, e possivelmente os parâmetros do processo também terão de ser alterados.

Ao final do projeto obteve-se o que foi proposto no item 1.4, tendo sido realizada a caracterização da máquina utilizada como mesa de coordenadas disponível no NUFER e feita a sua adaptação para que pudesse ser empregada neste trabalho. Foi desenvolvido o projeto do cabeçote, feito o controle de velocidade e integrado o acionamento do dispositivo ao comando da mesa de coordenadas. Por último, foi validado seu uso para AM com um teste de deposição e construção de uma geometria simples, confirmando sua capacidade de gerar um filamento contínuo.

Baseado nos resultados obtidos neste trabalho pode-se considerar a viabilidade em dar continuidade ao desenvolvimento deste sistema e implementar melhorias para aperfeiçoar ainda mais seu desempenho.

## **6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

O projeto foi concebido visando a obtenção de um filamento contínuo de massas cerâmicas, com isso não foram estudadas a fundo as propriedades mecânicas e também não foi parametrizado o pós-processamento da massa cerâmica empregada.

A sugestão para trabalhos futuros consiste em testar outras massas cerâmicas e parametrizar o processamento de cada uma delas, e com isso definir a mais adequada para ser processada pelo cabeçote desenvolvido.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBARO, J. L. A. A operação de prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial. Parte I: O preenchimento das cavidades do molde. **Cerâmica Industrial**. [S.l.] v.5, n 5, p. 23-28, 2000.

ALVES, Fernando J. L. Cerâmicos: Materiais em que Vale a Pena Pensar. In: JORNADAS DE FRACTURA DA SPM, 2000, Covilhã. **Anais...** Covilhã, [s.n.] p. 204-218.

STANDARD TERMINOLOGY FOR ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES. **ASTM F2792-10**. [S.l.], 2012.

BANDYOPADHYAY, Amit *et al.* Processing of piezocomposites by fused deposition technique. **Journal of the American Ceramic Society**. [S.l.], n. 80, p. 1366 – 1372, 1997.

BARNA, Josef; JANAK, Miroslav; FECOVA, Veronika. Technical and economical characteristics of 3D printing. **Progressive technologies of cutting**. Presov: p. 67 - 74, 2010.

BARSOUM, Michel. Fundamentals of Ceramics. **Materials Science Series**, International Editions, 1997.

BASSO, Cion Cassiano. **Motor de passo**. Curitiba: [s.n.], 1994. p. 49.

BRAGA, Newton C. Eletrônica Básica para Mecatrônica – 7º Parte Motores de Passo. **Revista Mecatrônica Fácil**, São Paulo, v. 2, n. 7, p. 58-63, nov. 2002.

CAPPI, Benjamin *et al.* Direct inkjet printing of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>: Characterization of ink, green, bodies and microstructure. **Journal of the European Ceramic Society**. [S. l.] n. 28, p. 2625 – 2628, 2008.

CAWLEY, James. **FA 1-6, D. Proc.** In: GAS TURBINE AND AEROENGINE CONGRESS AND EXHIBITION, 1997, Orlando. Anais...New York [s.n.].

CELANI, Gabriela; BERTHO, Beatriz C. **A prototipagem rápida no processo de produção de maquetes de arquitetura**. Curitiba: Graphica, 2007.

CHARTIER, Thierry *et al.* Stereolithography of structural complex ceramic parts. **Journal of Material Science**. [S. l.] n. 37, p. 3141 - 3147, 2002.

CONSTANDINOU, Timothy. Tudo sobre motores de passo: 2 Parte: Circuito excitador para 4 motores unipolares. **Elektor Eletrônica & Microinformática**, São Paulo, v. 3, n. 30, p. 34-43, ago. 2004.

CONTE, M.; IGARTUA, A. Study of PTFE composites tribological behavior. **Wear** [S.l.] v. 296, p. 568-574, 2012.

CORREIA, S. L.; HOTZA, D.; SEGADÃES, A. M. Otimização da resistência mecânica de corpos cerâmicos em função de matérias-primas e restrições de propriedades tecnológicas. **Cerâmica**. [S.l.] v.51, p.230-238, 2005.

ENGDAHL, Tomi. **How to use disk drive stepper-motors**. Disponível em <<http://www.epanorama.net/circuits/diskstepper.html>>. Acesso em: 21 jan. 2014.

FITZGERALD A. E.; KINGSLEY C. J.; KUSKO A., **Máquinas Elétricas**. Rio de Janeiro: Mc Graw-Hill, 1975.

GAHLER, A.; GUENSTER, J.; HEINRICH, J. G. Direct laser sintering of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> dental ceramic components by layer-wise slurry deposition. **Journal of the American Ceramic Society**. [S.l.], n. 89, p. 3076 - 3080, 2006.

GAYAKWAD R.; SOKOLOFF L., **Analog and digital control systems**. Prentice-Hall International Editions, New Jersey, p. 660, 1988.

GILDER J. H.; *et al.* **Focus on Stepping Motors**. Electronic Design, [S.l.] v. 25, n.22, October, 1977.

GRIDAL, Imen; EVANS, Julian R.G. Extrusion free forming of ceramics through fine nozzles. **Journal of the European Ceramic Society**. [S.l.], n. 23, p. 629 – 635, 2003.

GRIFFITH, Michelle L.; HALLORAN, John W. Freeform Fabrication of Ceramics via Stereolithography. **Journal of the American Ceramic Society**, [S.l.: s. n.], 1996.

GUENSTER, J.; ENGLER, S.; HEINRICH, J. G. Forming of complex shaped ceramic products via layer-wise slurry deposition (LSD). **Bulletin of the European Ceramic Society**. [S. l.], n. 1, p. 1 - 4, 2003.

HEINRICH, Juergen. G., *et al.* Microstructural evolution during direct laser sintering in the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO system. **Journal of Materials Science**. [S. l.], n. 42, p. 5307 - 5311, 2007.

HINCZEWSKI, C.; CORBEL, S.; CHARTIER, T. Ceramic suspensions suitable for stereolithography. **Journal of the European Ceramic Society**. [S. l.] n. 18, p. 583 - 590, 1998.

JACOBS, Paul F. **Rapid Prototyping and Manufacturing Fundamentals of Stereolithography**. Dearborn: SME, 1992.

JONES, Douglas W. **Control of Stepping Motors: A Tutorial**. The University of Iowa, Department of Computer Science, Iowa, 1998. Disponível em: <<http://cs.uiowa.edu/~jones/step/>>. Acesso em: 21 jan. 2014.

JUFER M., **Transducteurs Electromecaniques** - Traité d'Électricité. Presses Polytechniques Romandes, Lausanne: [s.n.] 1985.

KHODDAMZADEH, A.; LIU, R.; WU, X. Novel Polytetrafluoroethylene (PTFE) Composites with Newly Developed Tribaloy Alloy Additive for Sliding Bearing. **Wear**. [S.l.] v. 266, p. 646-657, 2009.

KLOSTERMAN, D. A., *et al.* Development of a curved layer LOM process for monolithic ceramics and ceramic matrix composites. **Rapid Prototyping Journal**. [S. l.], n. 5, p. 61–71, 1999.

KRAUSE, T. *et al.* **Process and a device for producing ceramic molds**. United States Patent and Trademark Office. n.6, p. 827 - 988, 2004.

LAIMAN, Russell. **Stepper Motors and Control. Part IV - Microstepping of Stepper Motors**. Disponível em

<<http://www.stepperworld.com/Tutorials/pgMicrostepping.htm>>. Acesso em: 23 de janeiro de 2010.

LEJEUNE, Martine; *et al.* Ink-jet printing of ceramic micro-pillar arrays. **Journal of the European Ceramic Society**. [S.l.], n. 29, p. 905 – 911, 2009.

LINUX CNC. **Enhanced Machine Controller - EMC**. Disponível em: <<http://www.linuxcnc.org/content/view/11/10/lang,en/>>. Acesso em: 23 de janeiro de 2014.

LOMBARDI, John L.; CALVERT, Paul. Extrusion freeforming of nylon 6 materials. **Polymer**. [S.l.], n. 40, p. 1775 – 1779, 1999.

LOUS, G. M. *et al.* Fabrication of piezoelectric ceramic/polymer composite transducers using fused deposition of ceramics. **Journal of the American Ceramic Society**. [S.l.], n. 83, p. 124 – 128, 2000.

LU, X., *et al.* Solvent-based paste extrusion solid free forming. **Journal of the European Ceramic Society**. [S.l.], n. 30, p. 1 – 10, 2010.

MADSEN, E. **Stepper motor convert pulses to accurate mechanical steps**. *Electronic Design*: [S.l.] v.28, n.9 p.205-209, abr 1980.

MORO, Norberto; AURAS, André P. **Elementos de máquinas II** – Características dos elementos. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina: Florianópolis, p. 24, 2006.

MOTTA, J.F.M., CABRAL Jr., TANNO, L.C. As Matérias-Primas Cerâmicas Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos. **Cerâmica Industrial**. [S.l.] v.6, n.2, p.32, 2001.

OBJET. **PolyJet Technology**. Disponível em: <[http://www.objet.com/Products/PolyJet\\_Technology\\_Movie/](http://www.objet.com/Products/PolyJet_Technology_Movie/)>. Acesso em: 23 de janeiro de 2014.

OBJET. **PolyJet™ Technology – 3 Dimensional Printing Objet**. Disponível em: <[http://www.objet.com/Products/PolyJet\\_Technology\\_Movie/](http://www.objet.com/Products/PolyJet_Technology_Movie/)>. Acesso em: 23 de janeiro de 2014.

OLUPOT, P. W. **Assessment of Ceramic Raw Materials in Uganda for Electrical Porcelain**. 2006. 20f. Thesis (Licentiate in Material Science) - Department of Materials Science and Engineering. Royal Institute of Technology, 2006.

ORILLE, A.; HUMET, L. Motores eléctricos de pequena potência. **Revista de Robótica**, [S.l.] n.30, p 105-114, mar-abr 1988.

PETRUSCH, Günther; SILVA, Jorge. V. L. de; VOLPATO, Neri; *et al.* **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. Cap. 7. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.

PETRUZELLA, Frank D. **Motores elétricos e acionamentos**. São Paulo: MCGraw-Hill, 2013.

PINHEIRO, B.C.A., **Análise microestrutural de porcelana tradicional**. 2005. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2005.

PTFE Composite Bearings. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. [S.l.] v.29, n. 09, 2010.

QUEIROZ, Ricardo A. Motores de passo. **Núcleo de Pesquisa em Redes de Computadores da Universidade de Salvador**. Salvador. 2003. p.19.

ROSOCHOWSKI, Andrzej; MATUSZAK, A. Rapid Tooling: The State of the Art. **Journal of materials processing technology**. [S.l.], n.106, p. 191 - 198, 2000.

SADEGHIAN, Z.; HEINRICH, J. G.; MOZTDARZADEH. F. **Direct laser sintering of hydroxyapatite implants by layer-wise slurry deposition (LSD)**, *cfi/Ber. DKG*, 82, E1-E5, 2004.

SAFARI, Ahmad; ALLAHVERDI, M.; AKDOGAN, E. K. Solid freeform fabrication of piezoelectric sensors and actuators. **Journal of Materials Science**. [S.l.] n.41, p. 177 - 198, 2006.

SCHINDLER, Karin; ROOSEN, Andreas. Manufacture of 3D structures by cold low pressure lamination of ceramic green tapes. **Journal of the European Ceramic Society**. [S. l.] n. 29, p. 899 – 904, 2009.

SILVA, A. G. P. **Apostila de Sinterização**. Rio de Janeiro: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, p.30, 2008.

SOUSA F. J. P.; NEVES W. F.; ALARCON O. E. Estudo da viabilidade de obtenção de isoladores elétricos a partir de resíduo de esmaltação. **Cerâmica**. v. 50. p. 217 – 224, 2004.

SOUZA, A. J. **Estudo da substituição de fundente natural por resíduo de rocha ornamental em massa cerâmica para piso vitrificado**. 2008. 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2008.

TAY, B. Y.; EVANS, J. R. G.; EDIRISINGHE, M. J. Solid freeform fabrication of ceramics. **International Materials Reviews**. [S.l.] n. 48, p. 341 - 370, 2003.

TIAN, Xiaoyong, *et al.* Process parameters analysis of direct laser sintering and post treatment of porcelain components using Taguchi's method. **Journal of the European Ceramic Society**. [S.l.], n. 29, p. 1903 - 1915, 2009.

TRAVITZKY, Nahum *et al.* Pre-ceramic paper-derived Ceramics. **Journal of the American Ceramic Society**. [S.l.], n. 91, p. 3477 – 3492, 2008.

ÜNLÜ, B. S.; UZKUT, M. **Tribological Behaviors of Polymer-based Particle-reinforced**. [S.l.] v.29, n. 09, 2010.

VAIDYANATHAN, R. *et al.* The extrusion free forming of functional ceramic prototypes. **Journal of the Minerals Metals & Society**. [S.l.], n. 52, p. 34 – 37, 2000.

VANDRESEN, M. **Aplicação da técnica do núcleo perdido na injeção de peças complexas, em moldes de ferramental rápido, a partir da estereolitografia**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2004.

VASCONCELOS, Pedro V.; LINO, F. Jorge; NETO, R. J; *et al.* Design Epoxy Resins Based Composites for Rapid Tooling Applications. In: **5th International Conference on Mechanics and Materials in Design**. Porto, p. 1-7, jul 2006.

VOLPATO, Neri. **Introdução à Tecnologia CNC e à Programação Manual de Torno e Fresadora**. 4 ° ed. Curitiba: [s.n.] (apostila), 2006.

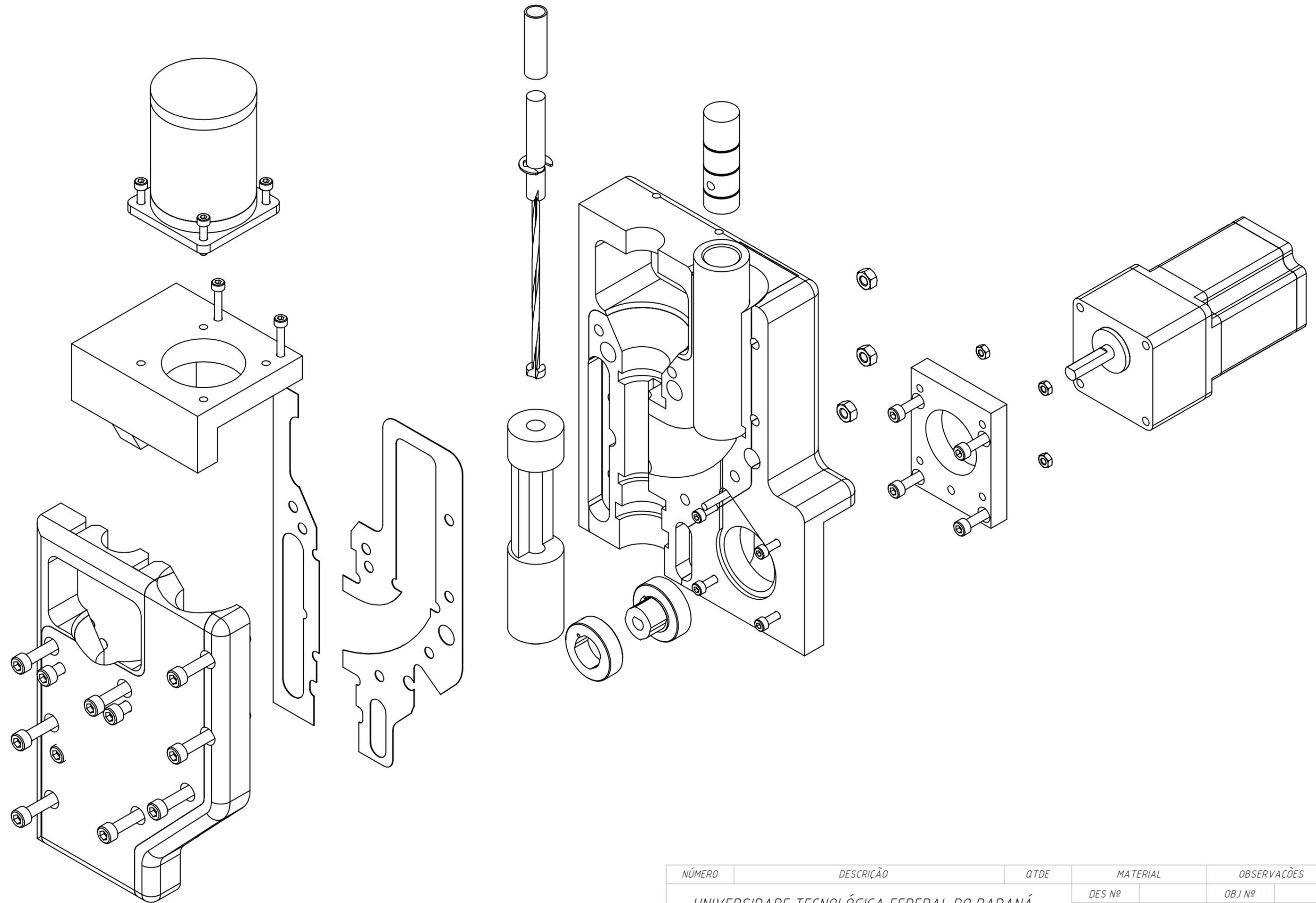
WERNECK, Pedro. Introdução ao Arduino. **Saber Eletrônica**, São Paulo, v. 45, n. 437, p. 46-51, junho 2009.

## APÊNDICE A

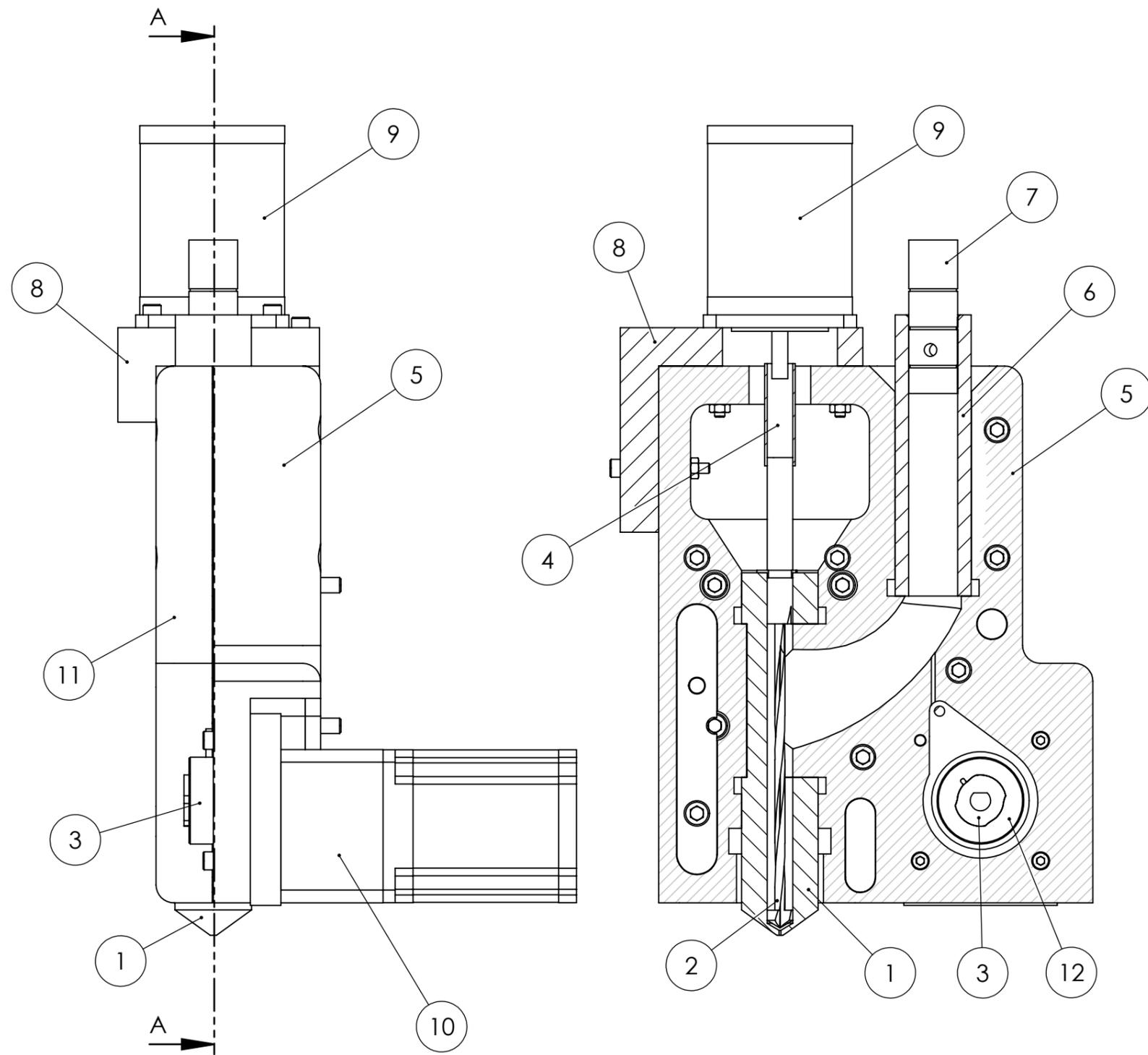
### DESENHOS DE MONTAGEM E DAS PEÇAS DO CABEÇOTE EXTRUSOR

Os desenhos de montagem do projeto e das peças fabricadas são apresentados de acordo com a seguinte sequência:

- Montagem – vista explodida
- Montagem cabeçote
- Bipartido parte da frente
- Bipartido parte de trás
- Flange do motor da rosca transportadora
- Bico extrusor
- Êmbolo de teflon grafitado
- Bucha de teflon grafitado
- Carretel macho
- Carretel Fêmea



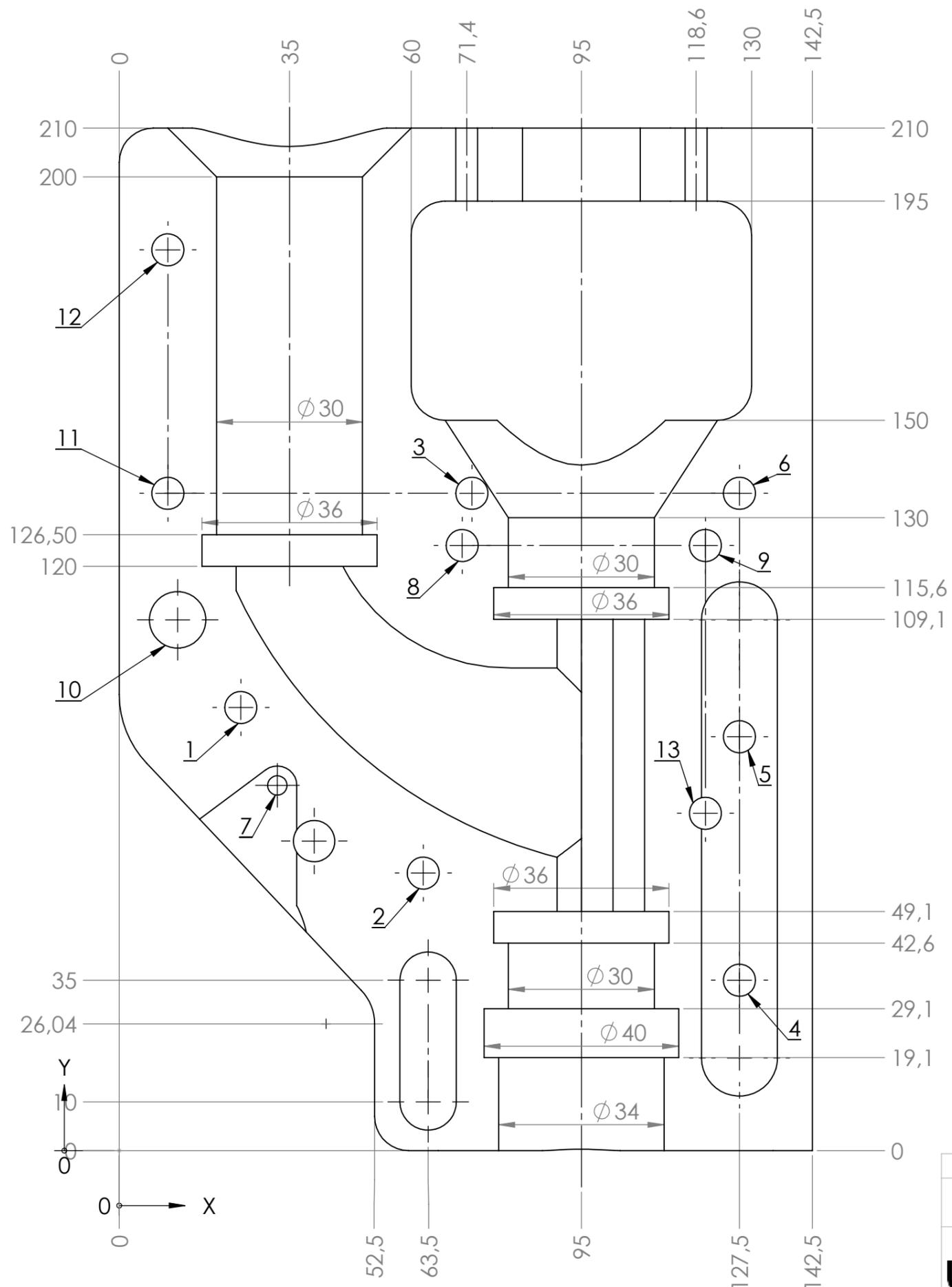
| NÚMERO                                     | DESCRIÇÃO | QTDE | MATERIAL  | OBSERVAÇÕES     |
|--|-----------|------|-----------|-----------------|
| UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ |           |      | DES Nº    | OBJ Nº          |
|  |           |      | UNIDADE   | DATA            |
| Tecnologia em Mecatrônica                  |           |      | ALUNO Nº  | NOME            |
|  |           |      | PROFESSOR | VISTO           |
| Montagem - Vista Explodida                 |           |      | ESCALA    | DIEDRO          |
|  |           |      | 1:2       | Primeiro Diedro |



| Nº | Descrição               | QTDE | Material       |
|----|-------------------------|------|----------------|
| 1  | Bico de Extrusão        | 1    | Alumínio       |
| 2  | Rosca                   | 1    | Aço Ferramenta |
| 3  | Polia Macho             | 1    | Resina         |
| 4  | Acoplamento             | 1    | Borracha       |
| 5  | Bipartido Parte de Trás | 1    | Resina         |
| 6  | Camisa do êmbolo        | 1    | Teflon         |
| 7  | êmbolo                  | 1    | Teflon         |
| 8  | Flange Motor Rosca      | 1    | Resina         |
| 9  | Motor Rosca             | 1    | -              |
| 10 | Motor êmbolo            | 1    | -              |
| 11 | Bipartido parte Frente  | 1    | Resina         |
| 12 | Polia Fêmea             | 1    | Resina         |

| NÚMERO                                     | DESCRIÇÃO | QTDE      | MATERIAL | OBSERVAÇÕES     |
|--|-----------|-----------|----------|-----------------|
| UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ |           | DES Nº    | OBJ Nº   |                 |
|  |           | UNIDADE   | mm       | DATA 10/08/2014 |
| Tecnologia em Mecatrônica                  |           | ALUNO Nº  | NOME     | A. Verguetz     |
| Montagem - Cabeçote de Extrusão            |           | PROFESSOR | David K. | VISTO           |
|  |           | ESCALA    | APROVADO | DIEDRO          |
|  |           | 1:2       |          | Primeiro Diedro |





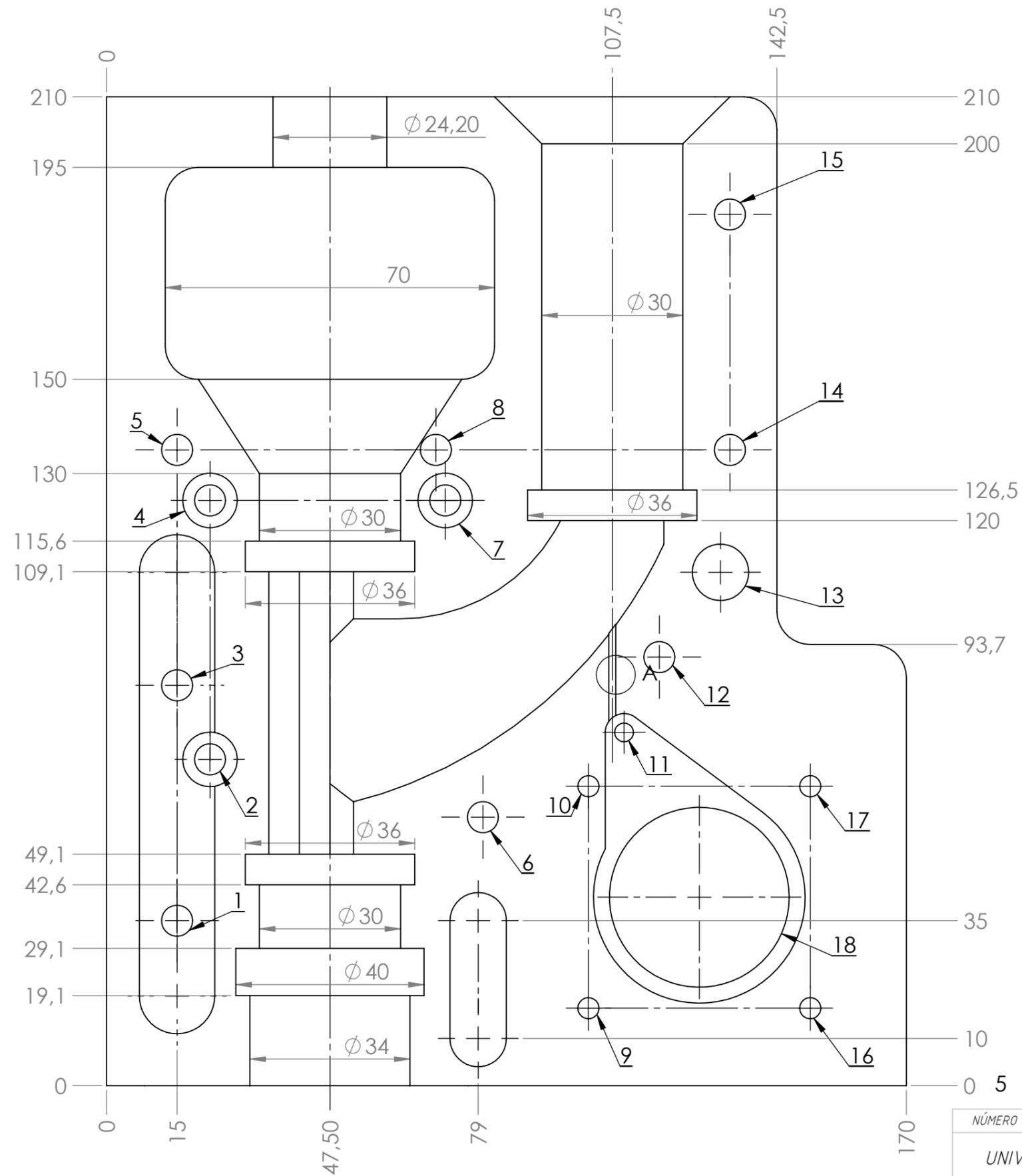
| Furo | X      | Y      | Diâmetro        |
|------|--------|--------|-----------------|
| 1    | 25     | 91     | Ø 6,60          |
| 2    | 62,50  | 57     | Ø 6,60          |
| 3    | 72,50  | 135    | Ø 6,60          |
| 4    | 127,50 | 35     | Ø 6,60          |
| 5    | 127,50 | 85     | Ø 6,60          |
| 6    | 127,50 | 135    | Ø 6,60          |
| 7    | 32,50  | 75     | Ø 4 prof. 17.50 |
| 8    | 70,50  | 124,27 | Ø 6,60          |
| 9    | 120,50 | 124,27 | Ø 6,60          |
| 10   | 12     | 109    | Ø 11,6          |
| 11   | 10     | 135    | Ø 6,60          |
| 12   | 10     | 185    | Ø 6,60          |
| 13   | 120,5  | 69,3   | Ø 6,60          |

|  |                           |      |           |                 |
|--|---------------------------|------|-----------|-----------------|
| 11   | Bipartido Parte da Frente | 1    | Resina    |                 |
| NÚMERO                                     | DESCRIÇÃO                 | QTDE | MATERIAL  | OBSERVAÇÕES     |
| UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ |                           |      | DES Nº    | OBJ Nº          |
|  |                           |      | UNIDADE   | DATA            |
|  |                           |      | ALUNO Nº  | NOME            |
|  |                           |      | PROFESSOR | VISTO           |
|  |                           |      | ESCALA    | APROVADO        |
|  |                           |      | 1:1       | DIEDRO          |
|  |                           |      |           | Primeiro Diedro |

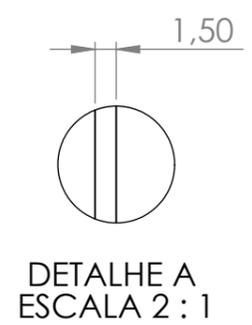


Tecnologia em Mecatrônica

Bipartido Parte da Frente

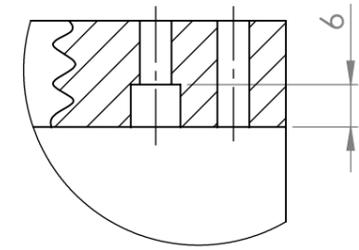
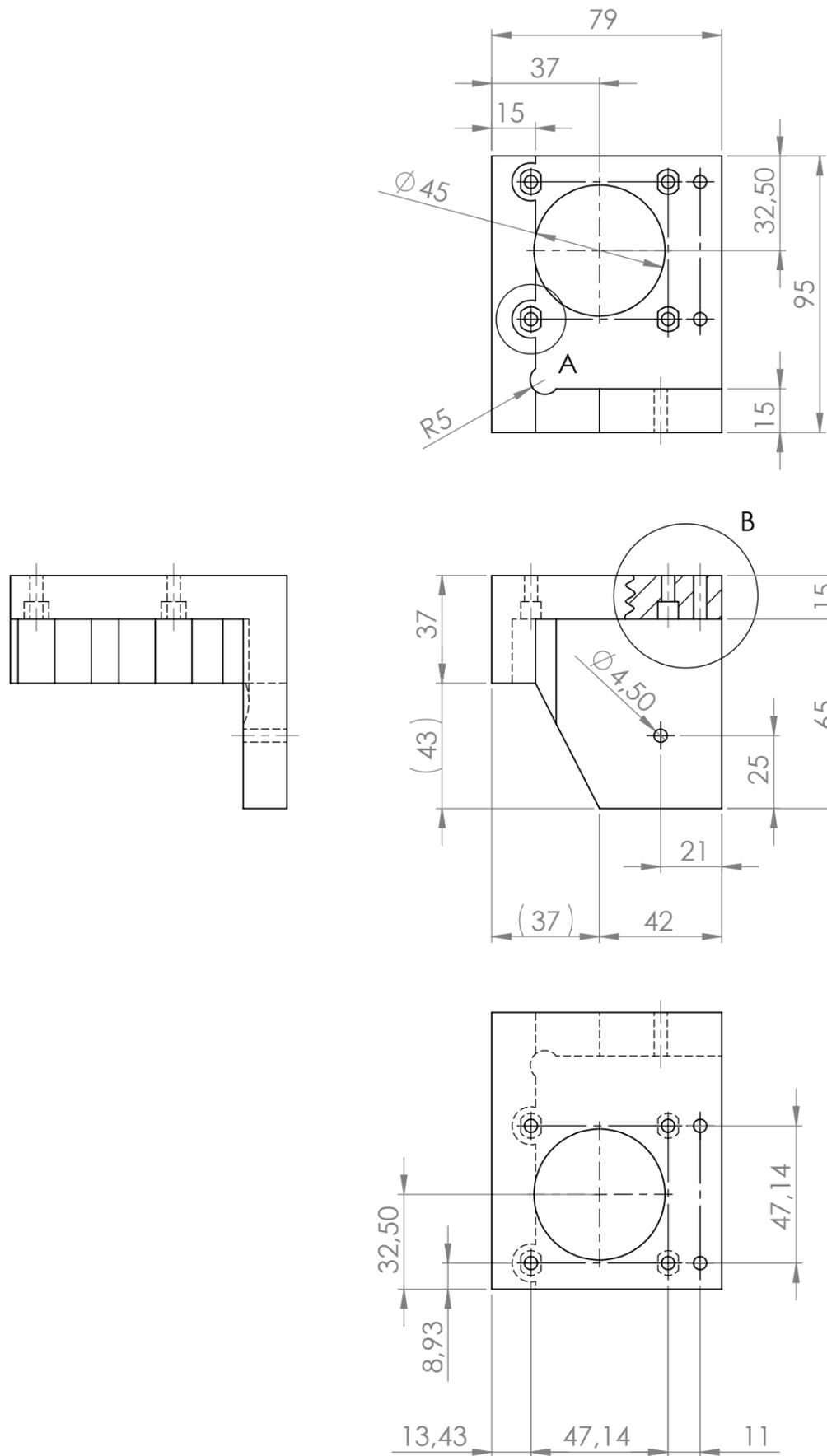


| Furo | X     | Y     | diâmetro |
|------|-------|-------|----------|
| 1    | 15    | 35    | 6,6      |
| 2    | 15    | 85    | 6,6      |
| 3    | 15    | 135   | 6,6      |
| 4    | 70    | 135   | 6,6      |
| 5    | 80    | 57    | 6,6      |
| 6    | 22    | 69,3  | 6,6      |
| 7    | 22    | 124,2 | 6,6      |
| 8    | 72    | 124,2 | 6,6      |
| 9    | 102,4 | 16,4  | 4,5      |
| 10   | 102,4 | 63,6  | 4,5      |
| 11   | 110   | 75    | 4        |
| 12   | 117,5 | 91    | 6,6      |
| 13   | 130,5 | 109   | 12       |
| 14   | 132,5 | 135   | 6,6      |
| 15   | 132,5 | 185   | 6,6      |
| 16   | 126   | 40    | 38,2     |
| 17   | 149,6 | 16,43 | 4,5      |
| 18   | 149,6 | 63,6  | 4,5      |

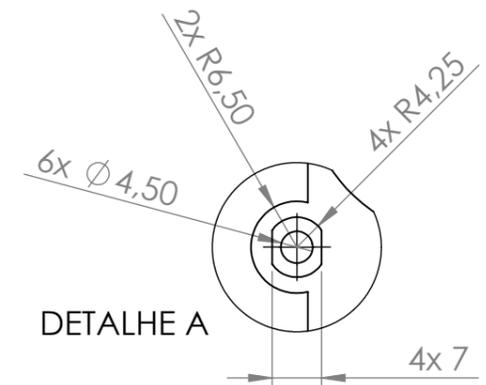
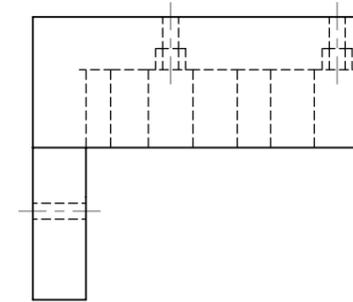


| 5  | Bipartido Parte de trás | 1    | resinas   | enxertado       |
|--|-------------------------|------|-----------|-----------------|
| NÚMERO                                     | DESCRIÇÃO               | QTDE | MATERIAL  | OBSERVAÇÕES     |
| UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ |                         |      | DES Nº    | OBJ Nº          |
|  |                         |      | UNIDADE   | DATA            |
|  |                         |      | ALUNO Nº  | NOME            |
|  |                         |      | PROFESSOR | VISTO           |
|  |                         |      | ESCALA    | APROVADO        |
|  |                         |      | 1:1       | DIEDRO          |
|  |                         |      |           | Primeiro Diedro |

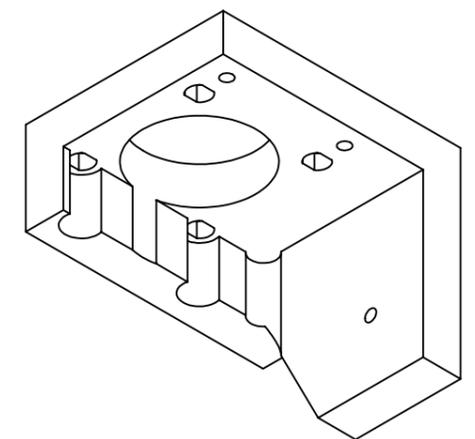




DETALHE B



DETALHE A



8 Flange do Motor Rosca 1 Resina

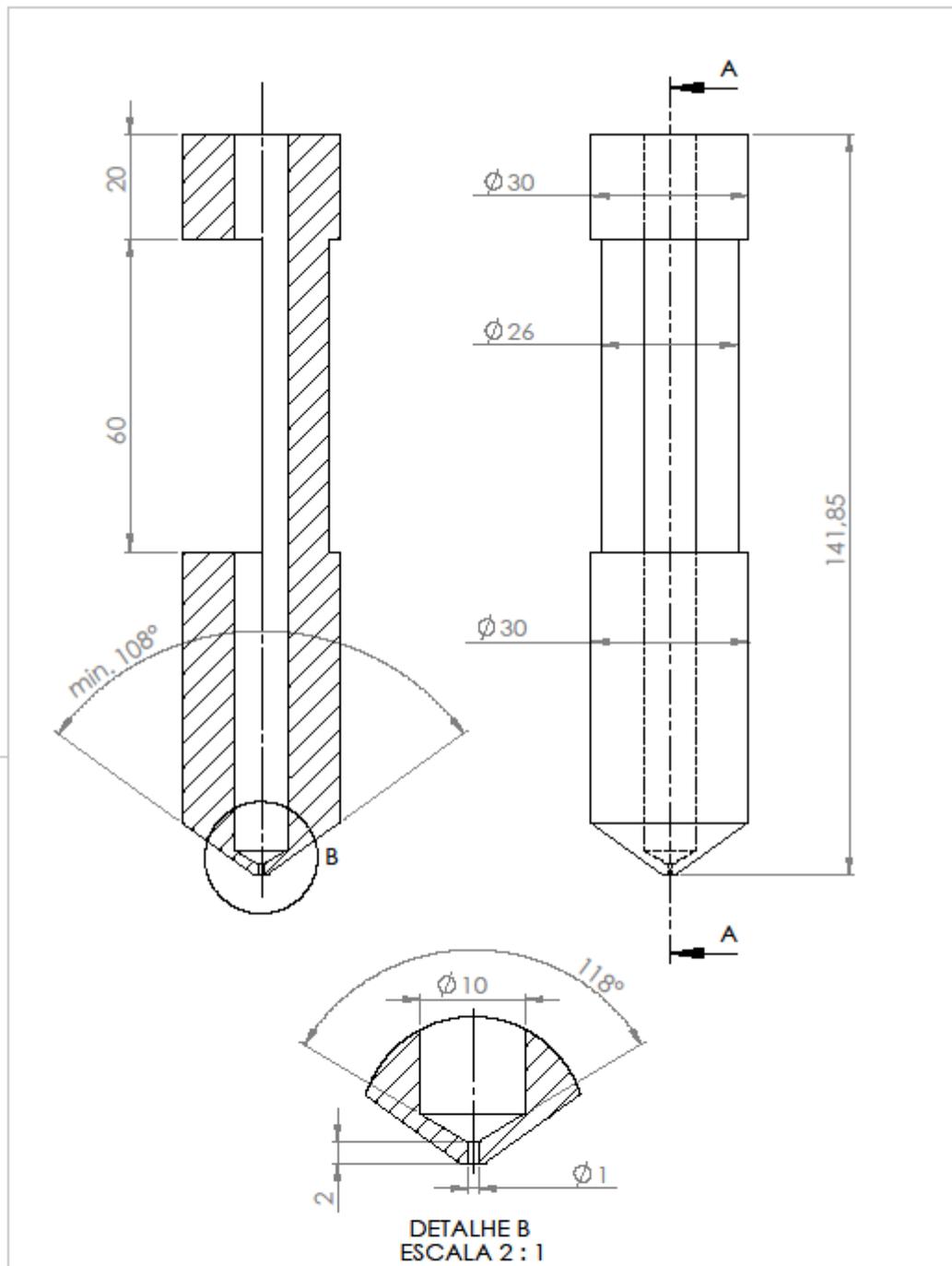
| NÚMERO | DESCRIÇÃO                                  | QTDE | MATERIAL  | OBSERVAÇÕES     |
|--------|--|------|-----------|-----------------|
|        | UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ |      | DES Nº    | OBJ Nº          |
|        |  |      | UNIDADE   | DATA            |
|        |  |      | ALUNO Nº  | NOME            |
|        |  |      | PROFESSOR | VISTO           |
|        |  |      | ESCALA    | APROVADO        |
|        |  |      |           | DIEDRO          |
|        |  |      |           | Primeiro Diedro |



Tecnologia em Mecatrônica

Flange do Motor Rosca

11



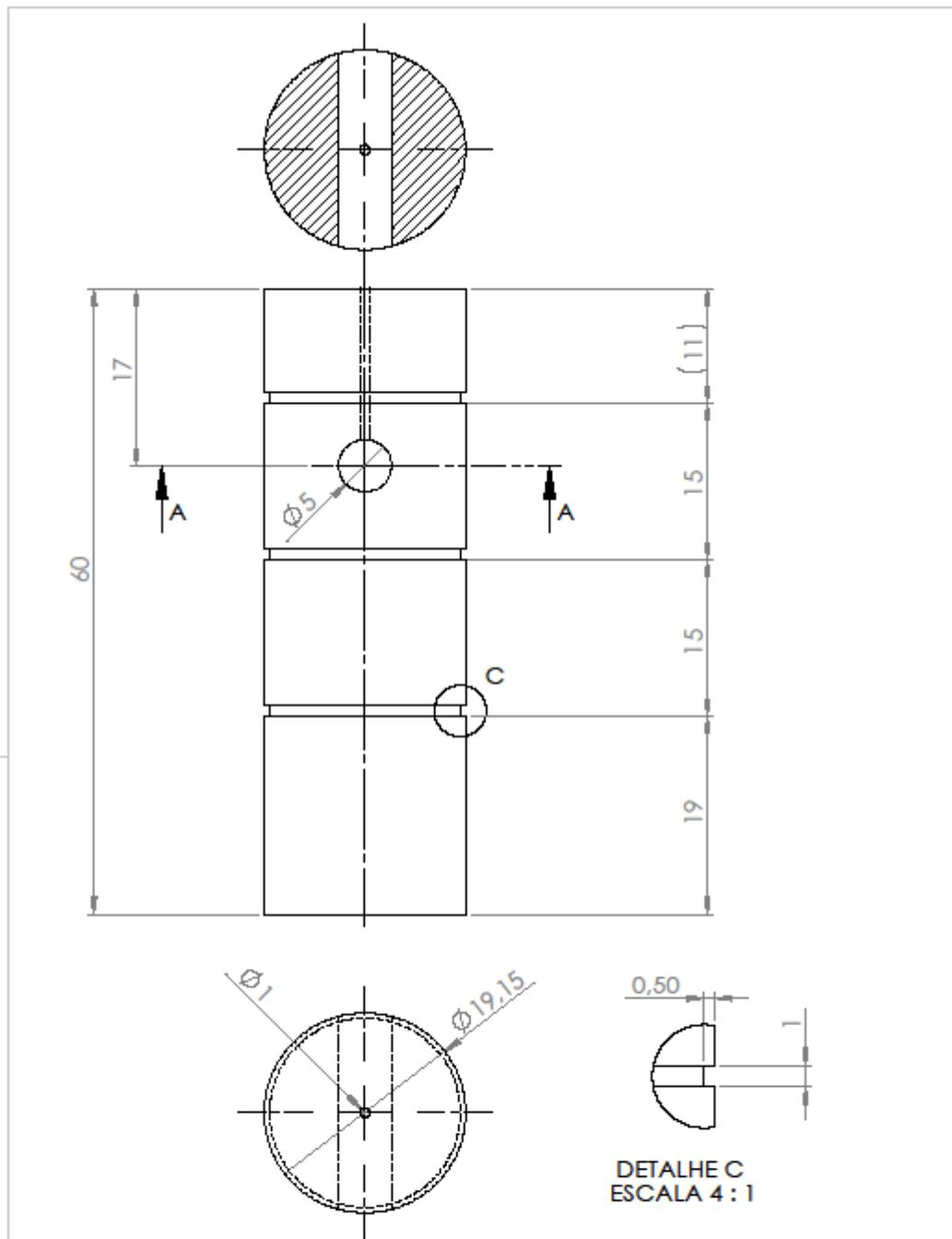
DETALHE B  
ESCALA 2 : 1

| 1  | Bico de Extrusão | 1   | Alumínio  |                  |
|--|------------------|-----|-----------|------------------|
| NÚMERO                                     | DESCRIÇÃO        | QTD | MATERIAL  | OBSERVAÇÕES      |
| UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ |                  |     | DES Nº    | OBJ Nº 1         |
|  |                  |     | UNIDADE   | mm               |
|  |                  |     | ALUNO Nº  | DATA 10/08/2014  |
|  |                  |     | PROFESSOR | NOME A. Verguetz |
|  |                  |     | ESCALA    | VISTO            |
|  |                  |     | 1:1       | APROVADO         |
|  |                  |     |           | DIEDRO           |
|  |                  |     |           | Primeiro Diedro  |



Tecnologia em Mecatrônica

Bico de Extrusão



7 Êmbolo

1 Teflon

| NÚMERO                                     | DESCRIÇÃO | Q TDE | MATERIAL  | OBSERVAÇÕES     |
|--|-----------|-------|-----------|-----------------|
| UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ |           |       | DES Nº    | OBJ Nº          |
|  |           |       | UNIDADE   | DATA            |
|  |           |       | ALUNO Nº  | NOME            |
|  |           |       | PROFESSOR | VISTO           |
|  |           |       | ESCALA    | DIEDRO          |
|  |           |       | 2:1       | Primeiro Diedro |



Tecnologia em Mecatrônica

Êmbolo

PROFESSOR David K.

ESCALA 2:1

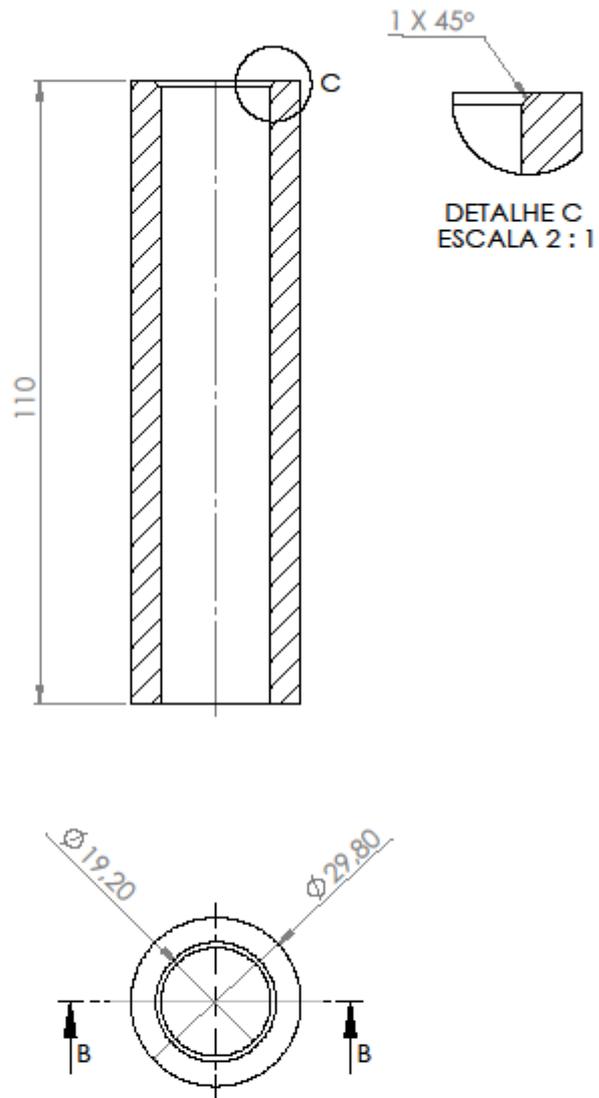
ALUNO Nº

NOME A. Verguetz

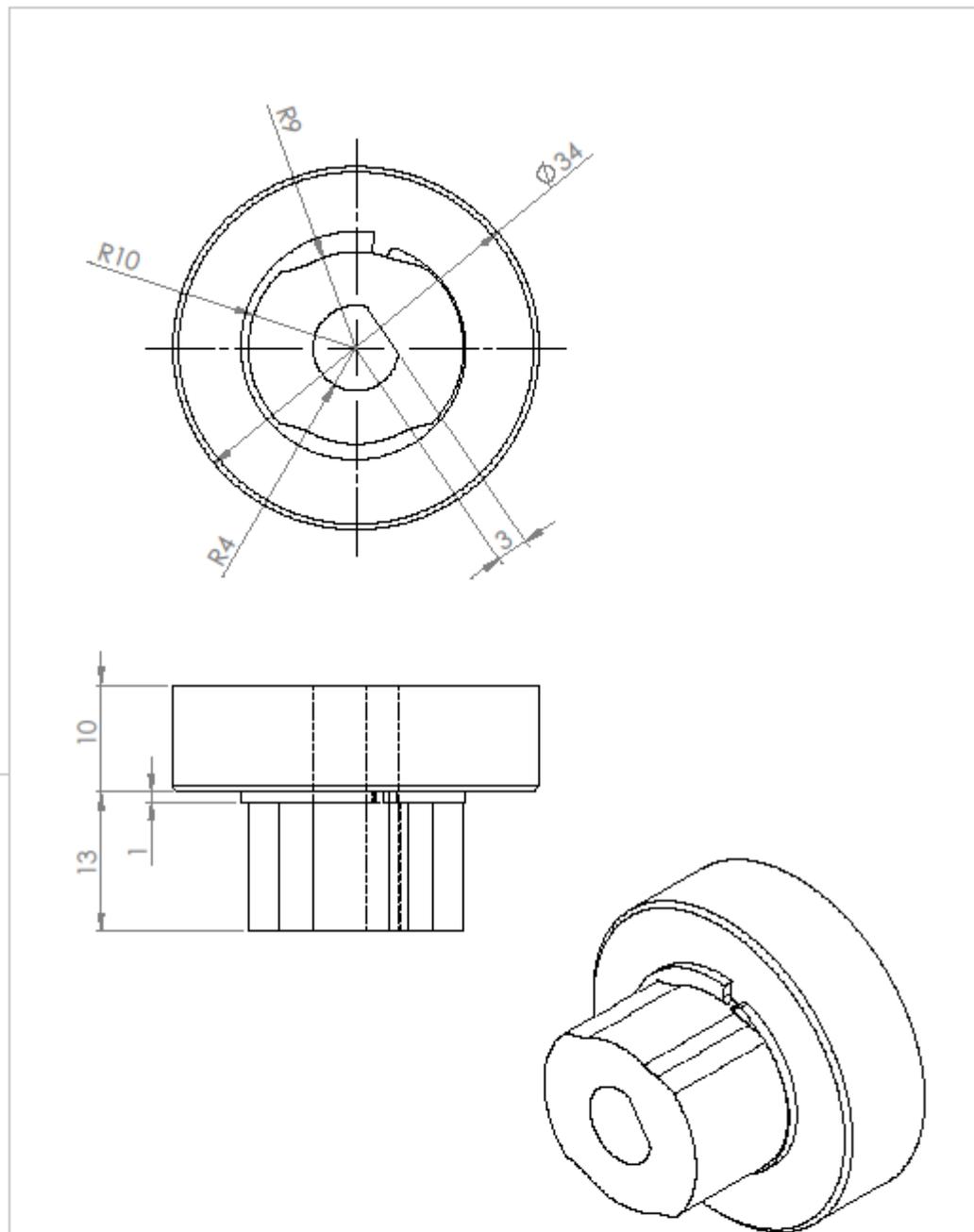
VISTO

DIEDRO

Primeiro Diedro



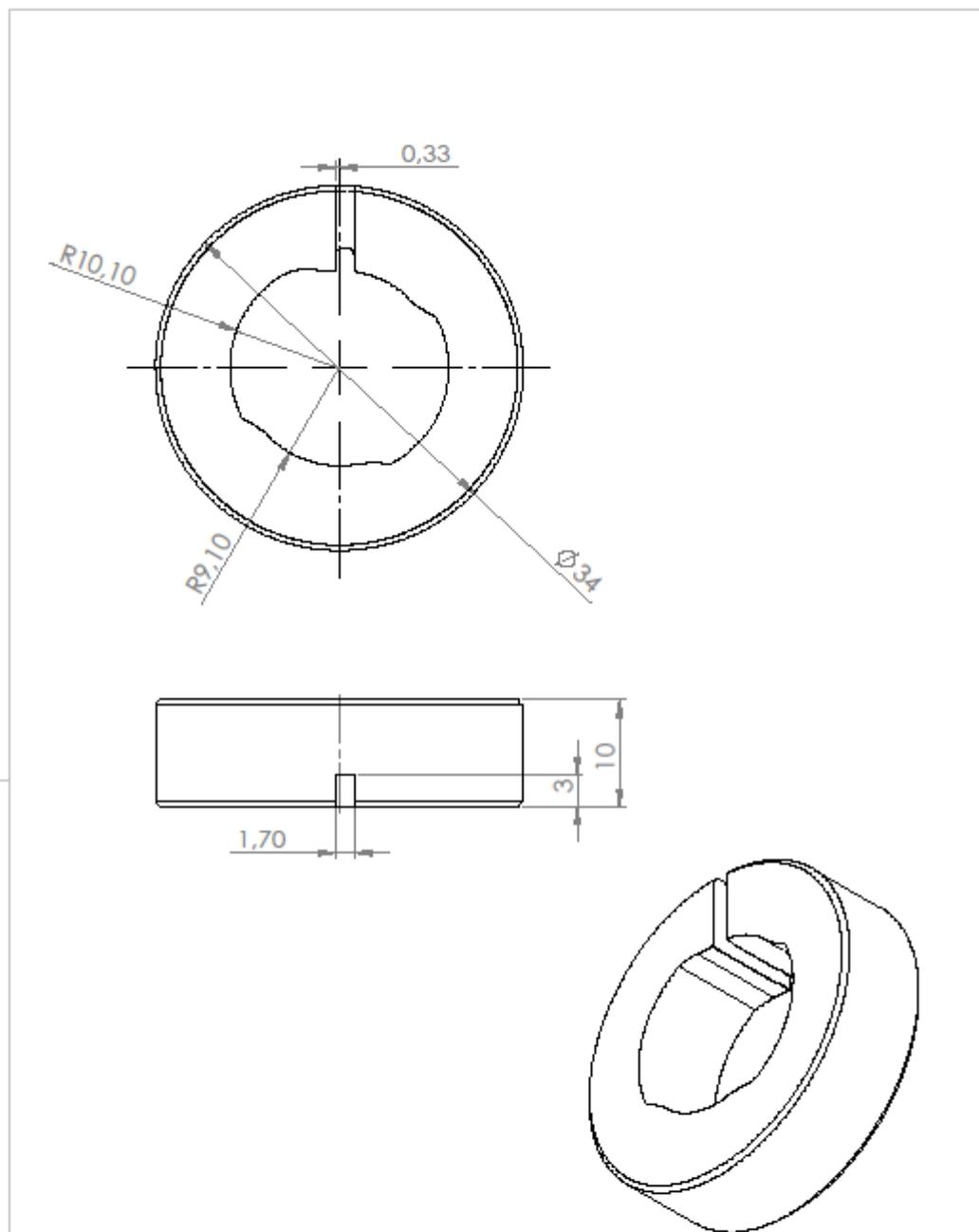
| 6   | Camisa para Êmbolo | 1     | Teflon    |                  |
|---|--------------------|-------|-----------|------------------|
| NÚMERO  | DESCRIÇÃO          | Q TDE | MATERIAL  | OBSERVAÇÕES      |
| UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  |                    |       | DES NR    | OBJ NR           |
|   |                    |       | UNIDADE   | DATA 10/08/2014  |
|  Tecnologia em Mecatrônica |                    |       | ALUNO NR  | NOME A. Verguetz |
|   |                    |       | PROFESSOR | David K.         |
| Camisa para Êmbolo  |                    |       | ESCALA    | DIEDRO           |
|   |                    |       | 1:2       | Primeiro Diedro  |



3 Polia Macho

1 Resina

| NÚMERO                                     | DESCRIÇÃO | QTD | MATERIAL           | OBSERVAÇÕES      |
|--|-----------|-----|--------------------|------------------|
| UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ |           |     | DES NR             | OBJ NR           |
|  |           |     | UNIDADE            | DATA 10/08/2014  |
| Tecnologia em Mecatrônica                  |           |     | ALUNO NR           | NOME A. Verguetz |
| Polia Macho                                |           |     | PROFESSOR David K. | VISTO            |
|  |           |     | ESCALA 2:1         | APROVADO DIEDRO  |
|  |           |     |                    | Primeiro Diedro  |



|  |             |     |           |             |                 |
|--|-------------|-----|-----------|-------------|-----------------|
| 12   | Polia Fêmea | 1   | Resina    |             |                 |
| NÚMERO                                     | DESCRIÇÃO   | QTD | MATERIAL  | OBSERVAÇÕES |                 |
| UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ |             |     | DES NR    | OBJ NR      |                 |
|  |             |     | UNIDADE   | DATA        | 10/08/2014      |
| Tecnologia em Mecatrônica                  |             |     | ALUNO NR  | NOME        | A. Verguetz     |
| Polia Fêmea                                |             |     | PROFESSOR | DAVID K.    | VISTO           |
|  |             |     | ESCALA    | APROVADO    | DIEDRO          |
|  |             |     | 2:1       |             | Primeiro Diedro |

## APÊNDICE B

### Programa de controle de velocidade do êmbolo

```

int arduino_pulsos_embolo=10;
int arduino_direcao_embolo=11;
int arduino_direcao_antihorario=0;
int m3_liga=6;
int m4_liga=5;
int estado_atual=0;
int estado_atual_1=0;
int estado_atual_2=0;
float velocidade=1400;//tempo de meio período de onda quadrada
long int cont_pulsos=0;
long int qty_pulsos_volta=160000;//200(motor)*40(driver)*20(redutor)
long int volta1=0;
long int volta2=0;
float t_embolo=0;

void setup() {
  pinMode(arduino_pulsos_embolo, OUTPUT);
  pinMode(arduino_direcao_embolo, OUTPUT);
  pinMode(m3_liga, INPUT);
  pinMode(m4_liga, INPUT);

  digitalWrite(m3_liga, LOW);
  digitalWrite(m4_liga, LOW);
  digitalWrite(arduino_pulsos_embolo, LOW);

  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  estado_atual = digitalRead(m3_liga);
  estado_atual_1 = HIGH;
  estado_atual_2 = digitalRead(m4_liga);
  volta1 = qty_pulsos_volta;
  volta2 = qty_pulsos_volta + qty_pulsos_volta/2;
  while(estado_atual == HIGH){
    estado_atual_1 = digitalRead(m3_liga);
    if(estado_atual_1 == LOW){

```

```
    estado_atual = LOW;
  }
  if(Serial.available()>0){
    velocidade=Serial.parseInt();
  }
  cont_pulsos=cont_pulsos+1;
  if(cont_pulsos<=volta1){
    t_embolo=velocidade;
  }
  if((cont_pulsos>volta1)&&(cont_pulsos<volta2)){
    t_embolo=velocidade*1,090891;
  }
  if(cont_pulsos==volta2){
    estado_atual = LOW;
  }
}
while(estado_atual_2 == HIGH){
  estado_atual_1 = digitalRead(m4_liga);
  if(estado_atual_1 == LOW){
    estado_atual_2 = LOW;
  }
  digitalWrite(arduino_direcao_embolo, LOW);
  digitalWrite(arduino_pulsos_embolo, HIGH);
  delayMicroseconds(50);
  digitalWrite(arduino_pulsos_embolo, LOW);
  delayMicroseconds(50);
}
digitalWrite(m3_liga, LOW);
}
```

## APÊNDICE C

### Programa de controle de velocidade da pá agitadora

```
int arduino_pulsos=12;
int arduino_direcao=13;
int m3_liga=6;
int m4_liga=5;
int estado_atual=0;
int estado_atual_1=0;
int estado_atual_2=0;
int velocidade=250;
void setup() {
  pinMode(arduino_pulsos, OUTPUT);
  pinMode(arduino_direcao, OUTPUT);
  pinMode(m3_liga, INPUT);
  pinMode(m4_liga, INPUT);

  digitalWrite(m3_liga, LOW);
  digitalWrite(m4_liga, LOW);
  digitalWrite(arduino_pulsos, LOW);

  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  estado_atual = digitalRead(m3_liga);
  estado_atual_1 = HIGH;
  estado_atual_2 = digitalRead(m4_liga);
  while(estado_atual == HIGH){
    estado_atual_1 = digitalRead(m3_liga);
    if(estado_atual_1 == LOW){
      estado_atual = LOW;
    }
    digitalWrite(arduino_direcao, HIGH);
    digitalWrite(arduino_pulsos, HIGH);
    delayMicroseconds(velocidade);
    digitalWrite(arduino_pulsos, LOW);
    delayMicroseconds(velocidade);
  }
  while(estado_atual_2 == HIGH){
    estado_atual_1 = digitalRead(m4_liga);
    if(estado_atual_1 == LOW){
```

```
    estado_atual_2 = LOW;
  }
  digitalWrite(arduino_direcao, LOW);
  digitalWrite(arduino_pulsos, HIGH);
  delayMicroseconds(velocidade);
  digitalWrite(arduino_pulsos, LOW);
  delayMicroseconds(velocidade);
}
digitalWrite(m3_liga, LOW);
}
```

## APÊNDICE D

### Programa de controle de velocidade da pá agitadora

```
G21 ; set units to millimeters
G21 (Unit in mm)
G90 (Absolute distance mode)
G64 P0.01 (Exact Path 0.001 tol.)
G17
G40 (Cancel diameter comp.)
G49 (Cancel length comp.)
G94
g01 f540
z13
M03 s1000 (ligar extrusão)
x-9 y100
G1 Z8.500 F540.000 (primeira camada 1 mm da mesa)
G1 X92 Y92 F540.000
G1 X108 Y92
G1 X108 Y108
G1 X92 Y108
G1 X92 Y92
G1 Z9.500 F540.000
G1 X108 Y92
G1 X108 Y108
G1 X92 Y108
G1 X92 Y92
G1 Z10.500 F540.000
G1 X108 Y92
G1 X108 Y108
G1 X92 Y108
G1 X92 Y92
y20
M5 (desligar extrusão)
z13
g01 x50
y-5
M2 (Program end)
```

## ANEXO A

### Folha de dados do teflon

| Propriedades Mecânicas   | Unidade         | Valor                                      | Método de Ensaio |
|--|-----------------|--|------------------|
| Densidade  | g / cm          | 2,14 - 2,2                                 | DIN 53479        |
| Resistência a ruptura  | dN / mm         | 200 - 350                                  | DIN 53455        |
| Alongamento até ruptura  | %               | 200 - 400                                  | DIN 53455        |
| Tensão de Alongamento 10%  | dN / mm         | 110 - 120                                  | DIN 53455        |
| Módulo E de tração   | dN / mm         | 7500                                       | DIN 53457        |
| Módulo de Cisalhamento   | dN / mm         | 2700                                       | DIN 53457        |
| Limite de escoamento 1%  | dN / mm         | 100  | ---              |
| Limite de escoamento 10%   | dN / mm         | 185  | ---              |
| Tensão limite de flexão  | dN / mm         | 180 - 200                                  | DIN 53452        |
| Resistência à flexão   | dN / mm         | Sem ruptura                                | DIN 53452        |
| Resistência ao impacto   | 10 dN. mm / mm  | Sem ruptura                                | DIN 53453        |
| Resistência ao impacto com entalhe   | dN. mm / mm     | 160  | DIN 53453        |
| Coefficiente de flexão alternada   | Carga alternada | >10  | DIN 53374        |
| Dureza Shore   | Shore D         | 55 - 59                                    | DIN 53505        |
| Coefficiente de atrito:<br>PTFE / PTFE Seco<br>Estático<br>Dinâmico<br>PTFE / PTFE - Lubrificado com óleo<br>PTFE / AÇO - Lubrificado com óleo | ---             | 0,09<br>0,09<br>0,04 - 0,07<br>0,02 - 0,06 | ---              |
| Resistência à compressão   | ---             | ---  | DIN 53454E       |
| Propriedades Físicas e Térmicas  | Unidade         | Valor                                      | Método de ensaio |
| Absorção de água   | %               | nulo                                       | ---              |
| Coefficiente linear de dilatação:<br>20 - 100°C<br>20 - 200°C<br>20 - 300°C  | K<br>K<br>K     | 16. 10<br>19,5. 10<br>25. 10               | DIN 52328        |
| Calor específico   | KJ / Kg. k      | 0,970                                      | ---              |
| Condutividade térmica  | W / m . k       | 0,23 - 0,47                                | DIN 52612        |
| Campo de aplicação térmica   | °C              | -200 até +260                              | ---              |
| Ponto de fusão   | °C              | +327                                       | ---              |
| Flamabilidade  | ---             | nulo                                       | ---              |

## ANEXO B

### Folha de dados do driver de micropasso

#### 3. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

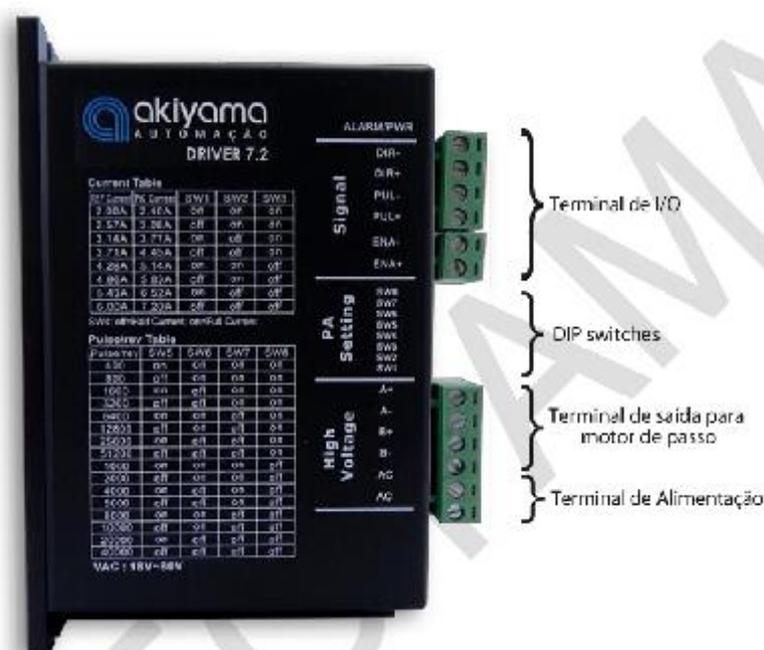
| Símbolo | Descrição                    | Min  | Típico | Max | Unidade |
|---------|------------------------------|------|--------|-----|---------|
| Vin     | Tensão de entrada            | 18   | 48     | 80  | Vac     |
|         |                              | 24   | 68     | 112 | Vdc     |
| Iout    | Corrente de saída            | 0.45 | -      | 7.2 | A       |
| Ilog    | Corrente sinal lógico        | 7    | 10     | 16  | mA      |
| Fmax    | Frequência máxima            | 0    | -      | 300 | Khz     |
| Tamb    | Temperatura ambiente         | 0    | 25     | 50  | °C      |
| Tstg    | Temperatura de armazenamento | -20  | 30     | 65  | °C      |

OBS: Os valores mínimos e máximos referentes à corrente de saída da tabela acima são valores de pico.  $1,00 A_{RMS} = 1,42 A_{PICO}$ .



#### 4. DESCRIÇÕES

Figura 1: DIAGRAMA DO DRIVER 7.2A



#### 4.1. CHAVES DE SELEÇÃO DE MICROPASSO

A seleção de micropassos é mudada através das chaves SW5, SW6, SW7 e SW8:

| Micro passo | Passos/rev | SW5 | SW6 | SW7 | SW8 |
|-------------|------------|-----|-----|-----|-----|
| 2           | 400        | ON  | ON  | ON  | ON  |
| 4           | 800        | OFF | ON  | ON  | ON  |
| 8           | 1600       | ON  | OFF | ON  | ON  |
| 16          | 3200       | OFF | OFF | ON  | ON  |
| 32          | 6400       | ON  | ON  | OFF | ON  |
| 64          | 12800      | OFF | ON  | OFF | ON  |
| 128         | 25600      | ON  | OFF | OFF | ON  |
| 256         | 51200      | OFF | OFF | OFF | ON  |
| 5           | 1000       | ON  | ON  | ON  | OFF |
| 10          | 2000       | OFF | ON  | ON  | OFF |
| 20          | 4000       | ON  | OFF | ON  | OFF |
| 25          | 5000       | OFF | OFF | ON  | OFF |
| 40          | 8000       | ON  | ON  | OFF | OFF |
| 50          | 10000      | OFF | ON  | OFF | OFF |
| 100         | 20000      | ON  | OFF | OFF | OFF |
| 200         | 40000      | OFF | OFF | OFF | OFF |

Relação para Transformação: 
$$RPM = \frac{PPS \times 60}{PPR}$$

PPR = 200 x (n° de divisão de passo)

RPM – Rotação por Minuto

PPS – Passo por Segundo

PPR – Passo por Revolução



#### 4.2. CHAVES DE SELEÇÃO DE NÍVEIS DE CORRENTE

Selecionar um nível de corrente acima da especificação de corrente do motor irá tornar o motor com mais torque, porém, ao mesmo tempo causará maior aquecimento, e isso não deverá ser feito, pois a seleção de corrente do driver deve ser definida de tal modo que o motor não superaqueça durante a operação. As conexões, paralelo e série das bobinas do motor irão alterar significativamente valores de indutância e resistência, por isso é importante selecionar o nível de corrente adequado conforme o esquema de ligação.

Os dados fornecidos nos datasheets dos motores de passo são importantes para a seleção do nível de corrente, porém a escolha também dependerá do tipo de conexão.

| Corrente Pico | SW1 | SW2 | SW3 |
|---------------|-----|-----|-----|
| 2,40A         | ON  | ON  | ON  |
| 3,08A         | OFF | ON  | ON  |
| 3,77A         | ON  | OFF | ON  |
| 4,45A         | OFF | OFF | ON  |
| 5,14A         | ON  | ON  | OFF |
| 5,83A         | OFF | ON  | OFF |
| 6,52A         | ON  | OFF | OFF |
| 7,20A         | OFF | OFF | OFF |

SW4 – OFF = redução de corrente para velocidade = 0rpm

ON = Corrente 100% para velocidade = 0rpm

Nota: devido à indutância do motor, a corrente real na bobina pode ser menor do que a corrente configurada, particularmente sob condição de alta velocidade.



#### 4.4. TERMINAIS DOS SINAIS DE ENTRADA (CONTROLE)

##### 4.4.1. Terminal do sinal de passo (Passo)

|           |   |
|-----------|---|
| PUL+/PUL- | O sinal do passo é usado para controlar a posição e a velocidade do motor de passo, o terminal Passo recebe um trem de pulsos que irá acionar o motor de passo a uma velocidade proporcional a frequência do trem de pulsos. O motor de passo pode ser precisamente posicionado pelo controle do número de pulsos em Passo. |
|-----------|---|

| SINAL | PNP   | NPN   |
|-------|-------|-------|
| PUL+  | Pulso | +Com  |
| PUL-  | -Com  | Pulso |

Obs: Caso Vcc seja maior que 5V adicionar resistor série nos terminais PUL e DIR, de acordo com a tabela abaixo.

| Vcc | R          |
|-----|------------|
| 5   | -----      |
| 12  | 680Ω (½) W |
| 24  | 2kΩ (½) W  |

##### 4.4.2. Terminal de sentido de giro do motor (DIR)

|           |  |
|-----------|--|
| DIR+/DIR- | O sinal em <u>nível alto</u> (5V) no terminal Dir, deve acionar o motor de passo no sentido horário, sinal em <u>nível baixo</u> (0V) o motor se move no sentido anti-horário. |
|-----------|--|

| Sinal | Sentido      |
|-------|--------------|
| 5V    | Horário      |
| 0V    | Anti-horário |

Obs: Caso Vcc seja maior que 5V adicionar resistor série nos terminais PUL e DIR, de acordo com a tabela abaixo.

| Vcc | R          |
|-----|------------|
| 5   | -----      |
| 12  | 680Ω (½) W |
| 24  | 2kΩ (½) W  |



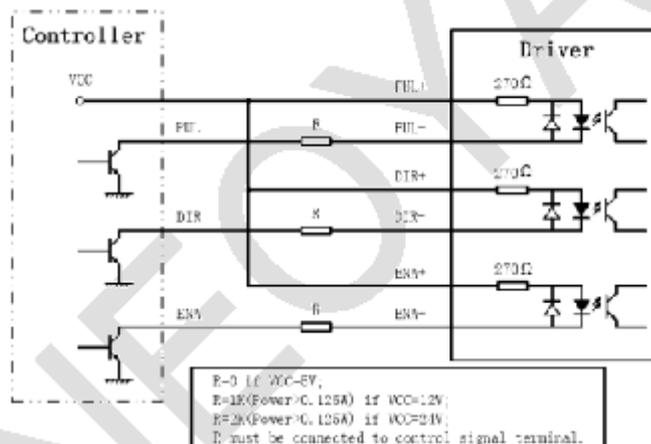
#### 4.4.3. Terminal Habilita/Desabilita (ENA+/ENA-)

|           |   |
|-----------|---|
| ENA+/ENA- | O sinal é usado para habilitar / desabilitar o driver. Nível lógico 1 desabilita o funcionamento do motor de passo. Se desconectado o driver está habilitado. |
|-----------|---|

#### 4.5. CONFIGURAÇÃO NPN

Sempre utilizar controladores ou geradores de pulso que utilizem sinais de controle tipo NPN, deve-se seguir o diagrama abaixo:

Figura 2: CONFIGURAÇÃO NPN



Os terminais PULL- e Dir- devem ser conectados a uma fonte de tensão de 5Vcc (fonte isolada do circuito de potência) para alimentação dos circuitos de comando.

Caso Vcc seja maior que 5V deve-se fazer o uso de um resistor em série de acordo com a tabela abaixo:

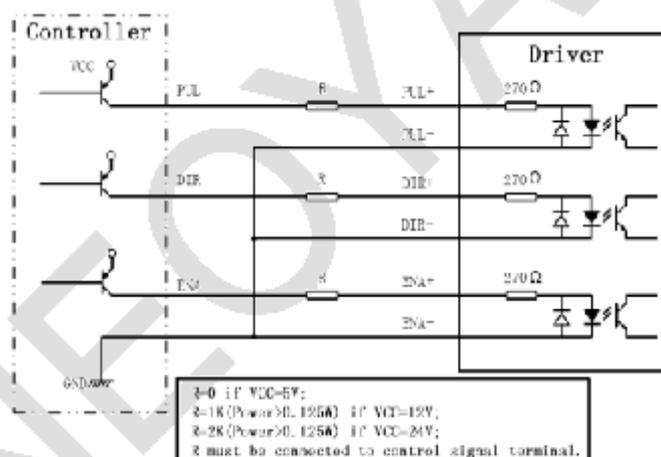


| Tensão | Resistor    |
|--------|-------------|
| 5Vcc   | -----       |
| 12Vcc  | 680Ω (½) W  |
| 24Vcc  | 2,2kΩ (½) W |

#### 4.6. CONFIGURAÇÃO PNP

Sempre que utilizar controladores ou geradores de pulso que utilizem sinais de controle tipo PNP, deve-se seguir o diagrama abaixo:

Figura 3: CONFIGURAÇÃO PNP



Os terminais PULL+ e Dir+ devem ser conectados a uma fonte de tensão de 5Vcc (fonte isolada do circuito de potência) para alimentação dos circuitos de comando. Caso Vcc seja maior que 5V deve-se fazer o uso de um resistor em série de acordo com a tabela abaixo:



| Tensão | Resistor    |
|--------|-------------|
| 5Vcc   | -----       |
| 12Vcc  | 680Ω (½) W  |
| 24Vcc  | 2,2kΩ (½) W |

#### 4.7. TERMINAIS DE SAÍDA

Nos terminais de saída devem ser ligados os motores de passo híbridos de 2 fases, com bobinas isoladas eletricamente entre si. Os terminais de ligação são: auxiliares

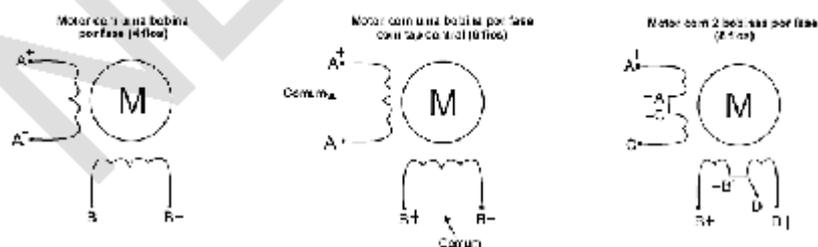
A+ e A- Terminais de conexão de uma fase do motor de passo

B+ e B- Terminais de conexão de outra fase do motor de passo

Os tipos de motores de passo que permitem acionamento bipolar são:

- ✓ Motor de uma bobina por fase, ou motor de 4 fios;
- ✓ Motor de uma bobina por fase com tap central, ou motor de 6 fios;
- ✓ Motor com duas bobinas por fase, ou motor de 8 fios.

Figura 4: ESQUEMA DE LIGAÇÃO DO MOTOR



## ANEXO C

### Folha de dados do motor do carretel



**N/P: AK23/R200F6FN1.8-G20-LINIX**  
 N/P Antigo: AK57H/3G20-1.8



**MOTOR DE PASSO COM CAIXA REDUÇÃO**

#### 1. Marca do Produto

**AKIYAMA MOTORS**

#### 2. Especificações Técnicas

| NEMA | Conexão         | Holding torque COM RED. (kgf.cm) | Holding torque SEM RED. (kgf.cm) | Corrente (A/fase) | Tensão (V/fase) | Resistência (mΩ/fase) | Indutância (mH/fase) |
|------|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|----------------------|
| 23   | Bipolar – Série | 300.0                            | 15.0                             | 2.1               | 3.4             | 140.0                 | 8.0                  |
|      | Unipolar        | 200.0                            | 10.0                             | 3.0               | 2.4             | 70.0                  | 2.0                  |

ASSISTÊNCIA TÉCNICA  
 CNPJ 15.806.916/0001-00  
 Rua Jota W.G. Wendel, 70 – Costa e Silva – Joinville/SC  
 CEP: 89218-470

SEDE ADMINISTRATIVA  
 Rua João Pessoa, 391 3º andar – Saguacú – Joinville/SC  
 CEP: 89221-605



Suporte Técnico (+55) 47 3028-6757

| Item                          | Especificação         |
|-------------------------------|-----------------------|
| Ângulo do passo               | 1.8°                  |
| Nº de passos                  | 200                   |
| Enrolamento                   | Espiras bifilares     |
| Temperatura máx, de operação  | 80 °C                 |
| Temperatura ambiente          | -10°C ~ 50°C          |
| Resistência de isolamento     | 100 Ω / 500 Vdc       |
| Rigidez dielétrica            | 600 Vac / 1 min       |
| Classe de isolamento          | B                     |
| Detent torque                 | 600 gf.cm             |
| Inércia do rotor              | 200 g.cm <sup>2</sup> |
| Quantidade de fios            | 6                     |
| Redução                       | 1:20                  |
| Peso                          | 1.2 Kg                |
| Sugestão de driver compatível | AKDMP5-3.5A           |

### 3. Sequência de Fases

| Passo | A+ | B- | A- | B+ |
|-------|----|----|----|----|
| 0     | +  | +  |    |    |
| 1     |    | +  | +  |    |
| 2     |    |    | +  | +  |
| 3     | +  |    |    | +  |

Sentido: horário
Sentido: anti-horário

Iniciando do Passo 0 – Sentido horário

Iniciando do Passo 3 – Sentido anti-horário



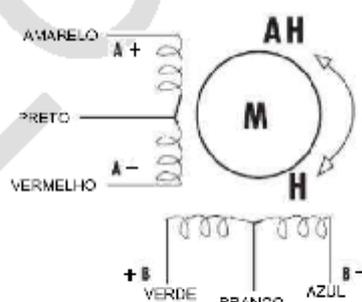
## 4. Esquema de Ligação

| Ligação bipolar série |                    |
|-----------------------|--------------------|
| Fios do motor         | Terminal do driver |
| Amarelo               | A+                 |
| Vermelho              | A-                 |
| Verde                 | B+                 |
| Azul                  | B-                 |
| Branco / Preto*       | Nenhuma conexão    |

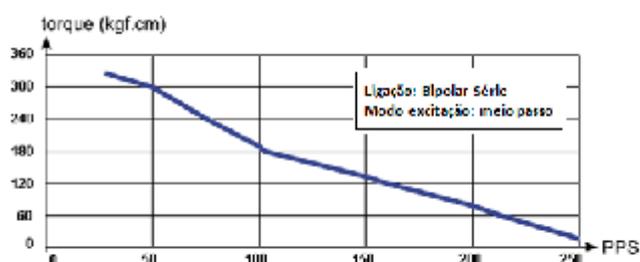
\*isolar separadamente

| Ligação unipolar* |                    |
|-------------------|--------------------|
| Fios do motor     | Terminal do driver |
| Amarelo           | A+                 |
| Vermelho          | A-                 |
| Verde             | B+                 |
| Azul              | B-                 |
| Branco / Preto    | comum              |

\*somente para acionamento de drivers unipolares



## 5. Gráfico de Desempenho



## 6. Relação para Transformação

$$RPM = \frac{PPS \times 60}{PPR}$$

PPR: 200 x (nº de divisão de passo)

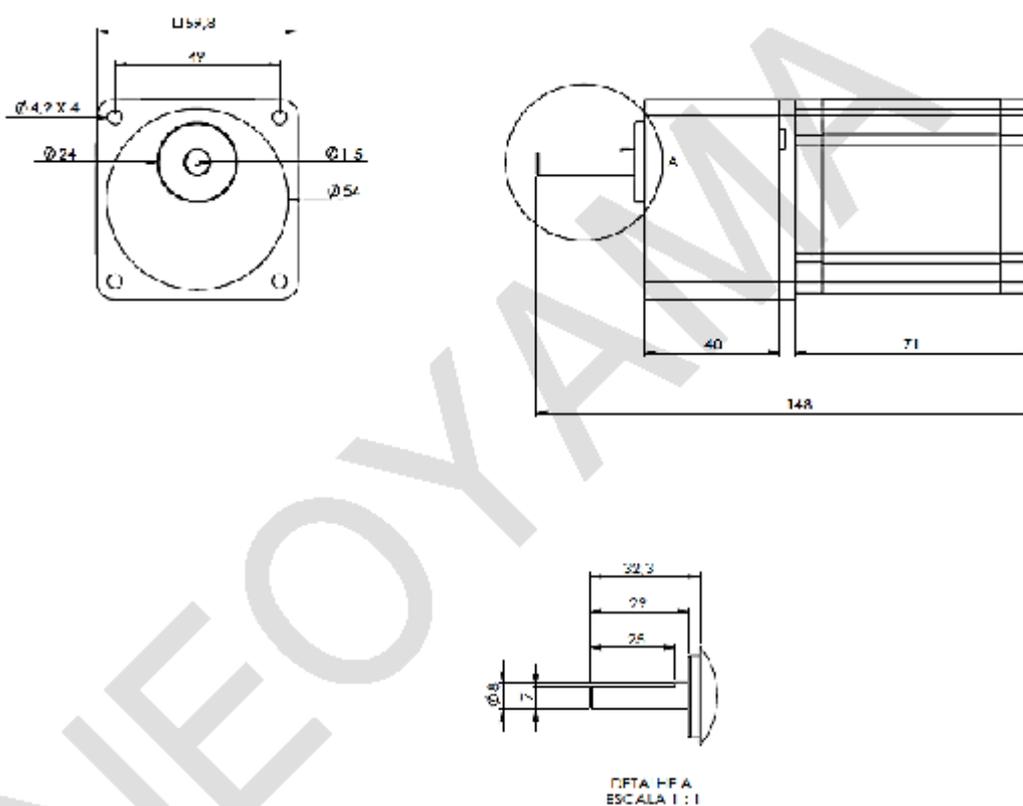
RPM: Rotação por Minuto

PPS: Passo por Segundo

PPR: Passo por Revolução



## 7. Desenho Técnico 2D



Unidade: mm

Disponibilizamos os Desenhos Técnicos 2D e 3D no site [www.neovama.com.br](http://www.neovama.com.br)



## ANEXO D

### Folha de dados massa cerâmica

#### MATERIAL SAFETY DATA SHEET

##### SECTION I PREPARATION AND PRODUCT INFORMATION

**MANUFACTURER:** THE POTTERY SUPPLY HOUSE LTD.  
**ADDRESS:** 1120 SPEERS ROAD  
 OAKVILLE, ONTARIO L6L 2X4  
**SUPPLIER:** THE POTTERY SUPPLY HOUSE LTD. TEL: 1 800 485-8544  
**ADDRESS:** 1120 SPEERS ROAD 905 849-5540  
 OAKVILLE, ONTARIO L6L 3X4 FAX: 905 849-0001  
**MATERIAL NAME:** CLAY BODY No. 910  
**MATERIAL USE:** A MOIST PORCELAIN CLAY FOR MODELING AND POTTING

##### SECTION II HAZARDOUS INGREDIENTS

| INGREDIENT     | %           | C.A.S.#    | LD50 | LC50 |
|----------------|-------------|------------|------|------|
| SILICA, QUARTZ | 15.4 - 19.2 | 14808-60-7 | N.A. | N.A. |

##### SECTION III PHYSICAL DATA

**PHYSICAL STATE:** MIXED PHASE, APPROX. 80% SOLID (SILICATE MINERALS), 20% LIQUID (WATER)  
**ODOUR / APPEARANCE:** GREY, WITH EARTHY ODOUR  
**ODOUR THRESHOLD:** NOT AVAILABLE  
**SPECIFIC GRAVITY:** NOT AVAILABLE  
**VAPOUR PRESSURE:** NOT AVAILABLE  
**VAPOUR DENSITY:** NOT AVAILABLE  
**EVAPORATION RATE:** NOT AVAILABLE  
**BOILING POINT:** NOT AVAILABLE  
**FREEZING POINT:** APPROXIMATELY 0° C (WATER)  
**PH:** NOT AVAILABLE  
**COEFF. WATER/OIL DISTRIBUTION:** NOT AVAILABLE

##### SECTION IV FIRE OR EXPLOSION HAZARD

**CONDITIONS OF FLAMMABILITY:** NOT FLAMMABLE  
**MEANS OF EXTINCTION:** NOT APPLICABLE  
**FLASHPOINT, METHOD OF DETERMINATION:** NOT APPLICABLE  
**UPPER FLAMMABLE LIMIT:** NOT APPLICABLE  
**LOWER FLAMMABLE LIMIT:** NOT APPLICABLE  
**AUTO-IGNITION TEMPERATURE:** NOT APPLICABLE  
**HAZARDOUS COMBUSTION PRODUCTS:** NONE KNOWN  
**EXPLOSION DATA:**  
**SENSITIVITY TO MECHANICAL IMPACT:** NONE  
**SENSITIVITY TO STATIC DISCHARGE:** NONE

##### SECTION V REACTIVITY DATA

**CONDITIONS UNDER WHICH PRODUCT IS CHEMICALLY UNSTABLE:** NONE KNOWN  
**NAME OF INCOMPATIBLE SUBSTANCES:** NONE KNOWN  
**CONDITIONS OF REACTIVITY:** CONTACT WITH POWERFUL OXIDIZING AGENTS SUCH AS FLUORINE, CHLORINE TRIFLUORIDE AND OXYGEN DIFLUORIDE MAY CAUSE FIRES.  
**HAZARDOUS DECOMPOSITION PRODUCTS:** NONE KNOWN

##### SECTION VI TOXICOLOGICAL PROPERTIES

**ROUTE OF ENTRY:** SKIN CONTACT: MECHANICAL IRRITATION IS POSSIBLE BUT UNLIKELY.  
**SKIN ABSORPTION:** NONE  
**EYE CONTACT:** DRY CLAY DUST MAY CAUSE ABRASION OF THE CORNEA.  
**INHALATION:** MAY CAUSE DAMAGE TO THE LUNGS BY INHALATION OF DUST.  
**INGESTION:** UNLIKELY TO BE TOXIC BY INGESTION.  
**EFFECTS OF ACUTE EXPOSURE:** MAY CAUSE DRYING AND REDDENING OF THE SKIN. MAY CAUSE EYE IRRITATION.  
**EFFECTS OF CHRONIC EXPOSURE:** OVEREXPOSURE TO RESPIRABLE CRYSTALLINE SILICA DUST MAY CAUSE:  
 1/ SILICOSIS, A FORM OF PROGRESSIVE PULMONARY FIBROSIS.  
 2/ SCLERODERMA, AN IMMUNE SYSTEM DISORDER MANIFESTED BY A FIBROSIS OF THE LUNGS, SKIN AND OTHER INTERNAL ORGANS.  
 SILICOSIS INCREASES THE RISK OF TUBERCULOSIS.  
 RECENT EVIDENCE SUGGESTS AN ASSOCIATION BETWEEN RESPIRABLE EXPOSURE AND A HIGHER INCIDENCE OF KIDNEY LESIONS.  
 CRYSTALLINE SILICA INHALED FROM OCCUPATIONAL SOURCES IS CLASSIFIED (IARC) AS CARCINOGENIC TO HUMANS.