



**Instituto Politécnico de Tomar**

**Escola Superior de Tecnologia de Abrantes**

**Levi Spencer Lopes Soares**

# **Impressora de Moldes 3D**

**Mestrado em Engenharia Mecânica – Projeto e Produção**

**Mecânica**

Orientado por:

Professor Doutor Bruno Chaparro, - Professor-adjunto do  
Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia de  
Abrantes – Instituto Politécnico de Tomar.



## *Resumo*

---

O processo de fundição consiste num conjunto de etapas necessárias para moldar certos materiais ou ligas. Na primeira etapa recorre-se à fusão do material, seguindo-se o seu escoamento ou vazamento para moldes adequados e posterior solidificação.

A Metalurgia tornou-se um dos sectores mais importantes da economia mundial por isso urgia aperfeiçoar métodos de fundição e surgiram técnicas mais modernas e eficazes.

Hoje em dia, recorre-se cada vez mais á Prototipagem Rápida. Esta técnica consiste na possibilidade de fabricar em série peças complexas a partir de um desenho em computador. A principal função de se produzirem protótipos é a de auxiliarem na análise, na funcionalidade e no efeito estético do produto projetado.

Para além disto, a prototipagem rápida é um processo fácil, de baixo custo e rápido.

## *Abstract*

---

The casting process consists of a set of steps necessary to mold certain materials or alloys. In the first stage the material is melted, followed by pouring or pouring into suitable molds and then solidification.

Metallurgy has become one of the most important sectors of the world economy so it was necessary to improve casting methods and more modern and efficient techniques have emerged.

Nowadays, Rapid Prototyping is increasingly used. This technique consists in the possibility of making in series complex pieces from a computer drawing. The main function of producing prototypes is to assist in the analysis, functionality and aesthetic effect of the projected product.

In addition, rapid prototyping is an easy, low-cost, and fast process.

## *Agradecimentos*

---

Gostaria de agradecer ao meu orientador Professor Doutor Bruno Chaparro, não só pela contínua dedicação e acompanhamento, mas também pelo *feedback* construtivo recebido em relação ao trabalho realizado, tendo este contribuído para um desenvolvimento de conhecimentos a nível pessoal.

Gostaria de reconhecer também o contributo para este trabalho de todos os meus amigos e colegas, tanto pelo apoio e disponibilidade, como por possibilitarem que este tenha decorrido de forma agradável, principalmente o Luis Silva. Agradeço também aos restantes pois são demasiados para nomear.

Por fim gostaria de agradecer o apoio e carinho incondicionais da minha família ao longo de toda a minha vida académica e profissional. Sem eles todo este percurso, incluindo este trabalho, não teria sido possível.

## *Índice*

---

Capítulo - 1 - Introdução.....	1
1.1. Introdução .....	1
1.2. Objetivos do Trabalho .....	1
Capítulo - 2 - Revisão bibliográfica.....	3
2.1. Técnicas aditivas de fabrico e sua caracterização.....	3
2.2. Etapas das técnicas aditivas de fabrico .....	4
2.2.1. Geração do modelo CAD.....	4
2.2.2. Geração do ficheiro STL .....	4
2.2.3. Orientação do modelo.....	4
2.2.4. Criação do suporte estrutural .....	4
2.2.5. Escolha dos parâmetros de impressão .....	4
2.3. Principais processos de fabrico aditivos .....	5
2.3.1. SL-Estereolitografia.....	5
2.3.2. FDM- Modelação por deposição de material fundido.....	6
2.3.3. LOM - Construção de objetos em lâminas .....	7
2.3.4. Ink-Jet - Impressão por jacto de tinta .....	8
2.3.5. SLS - Sinterização Seletiva a Laser.....	8
Capítulo - 3 - Método e Materiais.....	9
3.1. Wildlaser 1390LS Plus .....	9
3.2. Materiais utilizados para a mistura da areia .....	11
3.2.1. Areia, Resina e Endurecedor .....	12
3.2.2. Ferramentas desenvolvidas .....	15
3.2.3. Parâmetros do processo de sinterização .....	16
3.3. Produção do Molde Experimental .....	19

3.4. Conclusão .....	25
Capitulo - 4 - Caracterização da Máquina - Projetada.....	26
4.1. Apresentação.....	26
4.2. Funcionamento .....	28
Capitulo - 5 - Dimensionamento da Máquina.....	31
5.1. Estrutura.....	31
5.2. Caixa de Areia Superior.....	33
5.3. Caixa de Trabalho.....	33
5.4. Sistema de acionamento dos eixos de movimento .....	34
5.5. Porca .....	38
5.6. Acoplamentos .....	39
5.7. Guias Lineares .....	40
5.7.1. Calculo do Peso - Eixo da caixa Superior: .....	41
5.8. Motores .....	44
5.9. Notas finais: .....	46
Capitulo - 6 - Conclusão .....	47
Capitulo - 7 - Referências .....	48
Capitulo - 8 - Anexos.....	49
8.1. Anexo 1 - Ficha Técnica da Areia .....	49
8.2. Anexo 2 - Ficha Técnica da Resina - SANSET HB 031 .....	50
8.3. Anexo 3 - Ficha Técnica do Endurecedor - ENDURECEDOR AT 21 ...	51
8.4. Anexo 4 - Características do Fuso .....	52
8.5. Anexo 5 - Características dos Motores .....	53
8.6. Anexo 6 - Acoplamentos .....	54
8.7. Anexo 7 - Guias HIWIN.....	55
8.8. Anexo 8 - Alguns desenhos 2D - Impressora de Moldes 3D .....	56

## *Indicie Figuras*

---

Figura 1.Etapas das técnicas aditivas de fabrico.....	3
Figura 2-Exemplo dispositivo de Estereolitografia .....	6
Figura 3-Modelação por deposição de material fundido .....	6
Figura 4-LOM- Construção de objetos em lâminas .....	7
Figura 5-Técnica de sinterização seletiva a laser.....	8
Figura 6-Wildlaser LS1390Plus .....	10
Figura 7- Corte a laser .....	10
Figura 8- Bancada de trabalho para a preparação de misturas de areias. ....	11
Figura 9-Processo de pesagem de areia .....	14
Figura 10- Corte placa de acrílico com 6mm de espessura .....	15
Figura 11- Criação de espátulas através de Software CAD.....	16
Figura 12- Placa de experiência.....	17
Figura 13 - Sinterização de amostras.....	17
Figura 14 - Sinterização amostra a 38%. ....	18
Figura 15-Alturas de sinterização em mm.....	19
Figura 16 - Espátula de 0,5mm.....	20
Figura 17 - Desenho CAD molde. ....	20
Figura 18 - Montagem. ....	21
Figura 19 - Sinterização laser base do molde. ....	22
Figura 20 - Sinterização laser do molde. ....	22
Figura 21 - Limpeza do molde.....	23
Figura 22 - Processo de fusão do Chumbo. ....	24

Figura 23 - Processo de vazamento do chumbo. ....	24
Figura 24 - Desmoldação da peça. ....	25
Figura 25 - Máquina Impressora 3D para moldes de areia. ....	26
Figura 26 - Caixa de Trabalho e caixa de Abastecimento. ....	27
Figura 27 - Principais Elementos da Máquina. ....	28
Figura 28 - Indicação de posição inicial de trabalho da máquina. ....	28
Figura 29 - Movimento 1 - descida do aro de elevação. ....	29
Figura 30 - Movimento 2 - deposição de areia ....	29
Figura 31 - Movimento 3 - Sinterização. ....	30
Figura 32 - Perfil em alumínio comercial (Minitec 90x90S). ....	32
Figura 33 - Suporte base da máquina. ....	32
Figura 34 - Conjunto Caixa de Areia Superior. ....	33
Figura 35 - Conjunto Caixa de Trabalho ....	34
Figura 36 - Contacto em dois ou quatro pontos por esfera num fuso e porca de esferas ....	34
Figura 37 - Fuso e porca de esferas HIWIN. ....	35
Figura 38 - Acionamento da Máquina por fuso e porca esférica. ....	36
Figura 39 - coeficiente de velocidade crítica dependente do tipo dos apoio do fuso ....	37
Figura 40 - Distancia entre os apoios do fuso. ....	37
Figura 41 - Sistema de transmissão de potência - Eixo do laser. ....	39
Figura 42 - Acoplamento Flexível. ....	40
Figura 43 - Acoplamento flexível montado. ....	40
Figura 44 - Série QHW - HIWIN. ....	41
Figura 45 - Montagem de Guias QHW15CC - HIWIN. ....	41
Figura 46 - Indicação do eixo da caixa superior para cálculo do peso. ....	42
Figura 47 - Exemplo de calculo da carga das guias. ....	43
Figura 48 - configuração do eixo da caixa de Trabalho. ....	44

## *Índice de Tabelas*

---

Tabela 1- Características Wildlaser LS1390 Plus .....	10
Tabela 2- Características areia revestida 50/20 .....	12
Tabela 3-Constituição da mistura .....	14
Tabela 4 - Dimensões do Fuso.....	35

## *Abreviaturas*

---

2D - Bidimensional

3D - Tridimensional

CAD - Computer Aided Design

CAM - Computer Aided Manufacturing

PR - Prototipagem Rápida

FRF - Fabrico Rápido de Ferramentas

FDM - Fused Deposition Modeling

LOM - Laminated Object Manufacturing

SLS - Selective Laser Sintering (Sinterização seletiva a laser)

STL - Structural Triangular Language

SL - Stereolithography (Estereolitografia)

## Capítulo - 1 - Introdução

---

### 1.1. Introdução

A globalização da economia criou em todos os sectores industriais uma necessidade crescente de resposta rápida às solicitações do mercado. Este tipo de resposta traduz-se na redução drástica do tempo de colocação no mercado de novos produtos (“time to market”), sendo um fator crítico para a competitividade e agressividade comercial das empresas, determinando assim a sua capacidade de subsistência. Uma das tecnologias mais determinantes na mudança radical de funcionamento das empresas perante estes novos desafios foi a introdução dos sistemas de CAD/CAM e da capacidade de modelação CAD 3D. Mais recentemente, as tecnologias de prototipagem rápida (PR) e fabrico rápido de ferramentas (FRF) vieram reforçar significativamente esta capacidade em reduzir o time to market [1]. Pretende-se com esta comunicação fazer uma curta introdução à PR e aos seus processos e finalmente apresentar a evolução da sua utilização no nosso País.

A utilização da PR pode eventualmente provocar um aumento dos custos diretos de projeto, contudo, a segurança induzida na equipa de projeto pode traduzir-se em ganhos significativos em termos do *time to market*, garantindo assim uma maior agressividade e consequente vantagem competitiva da empresa utilizadora. Os aparentes incrementos no custo final do produto podem traduzir-se em grandes lucros globais. Paralelamente, a realização rápida de protótipos pode constituir um suporte às ações de marketing e mesmo um precioso auxiliar à comercialização dos produtos.

### 1.2. Objetivos do Trabalho

O seguinte trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um sistema protótipo de adição controlada de materiais para a fabricação de componentes com gradientes funcionais através da técnica de sinterização seletiva a laser.

Por isso tem como objetivos específicos:

1. Realização de um projeto baseado no processo de sinterização a laser

2. Desenvolver e construir um molde que se consiga produzir através da técnica de sinterização a laser.
3. Desenvolvimento de uma impressora de molde 3D, capaz de produzir esse molde.

## Capítulo - 2 - Revisão bibliográfica

---

### 2.1. Técnicas aditivas de fabrico e sua caracterização

As técnicas aditivas de fabrico referem-se aos processos pelo qual um modelo geométrico em três dimensões é utilizado para construir um componente em camadas de material.

O termo "impressão 3D" é cada vez mais utilizado como sinónimo de técnica aditiva de fabrico. Os componentes são produzidos utilizando materiais que podem ser sob forma de pó, líquida ou sólida [2]. Independentemente da técnica utilizada, os processos aditivos de fabrico têm em comum, as seguintes etapas apresentadas na figura 1[3]

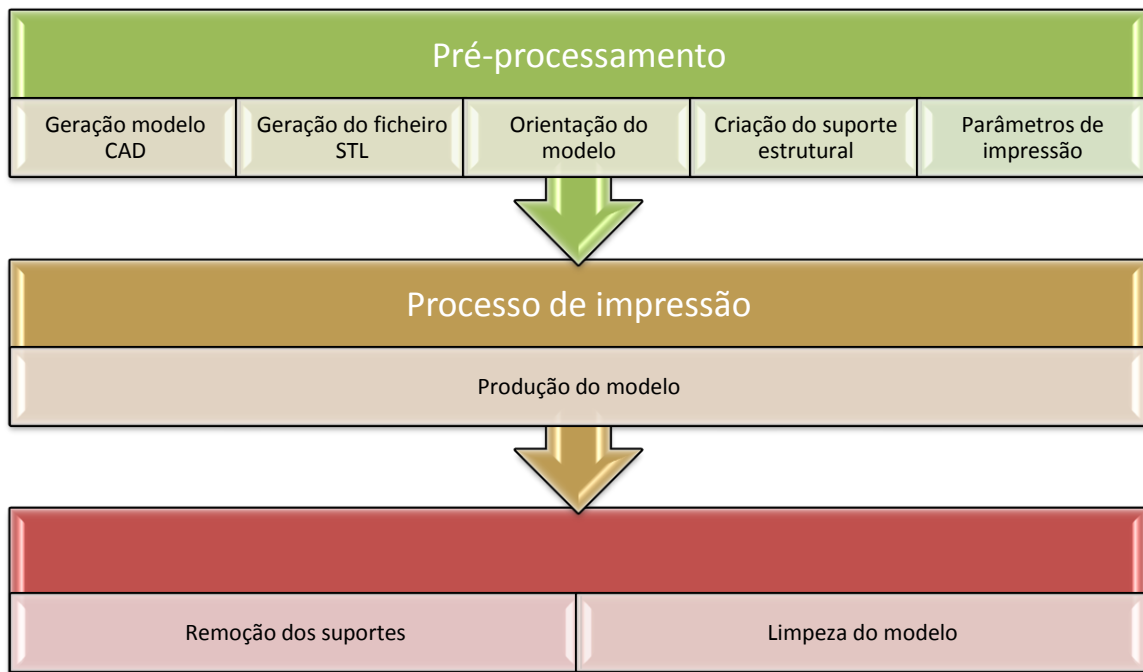


Figura 1. Etapas das técnicas aditivas de fabrico

## **2.2. Etapas das técnicas aditivas de fabrico**

### **2.2.1. Geração do modelo CAD**

De forma a conseguir produzir um modelo digital tridimensional, existe a necessidade de utilizar software de desenho assistido por computador (CAD).

### **2.2.2. Geração do ficheiro STL**

Nesta etapa ocorre a conversão para um ficheiro do tipo STL [4], sendo este o formato mais usual em técnicas aditivas de fabrico. Este formato faz uma aproximação do modelo sólido através de pequenos triângulos. Quando menores forem os triângulos, melhor vai ser a aproximação da superfície. Quando obtido o ficheiro STL, este deve ser convertido num conjunto de camadas finas de secções transversais através da intersecção de uma série de planos XY sobre o modelo

### **2.2.3. Orientação do modelo**

A orientação da peça influencia a qualidade superficial do modelo final, resistência mecânica, necessidade de suportes estruturais e tempo de fabrico [5].

### **2.2.4. Criação do suporte estrutural**

Em modelos que na sua geometria possuam zonas sem apoio, necessitam de ter suportes estruturais. Os suportes servem para fazer a fixação do modelo à plataforma de construção, evitando que o modelo seja corretamente produzido. Após a fabricação de peças com suporte estrutural é necessário realizar a sua remoção, que pode ser remoção mecânica, remoção por dissolução química e remoção térmica.

### **2.2.5. Escolha dos parâmetros de impressão**

Após carregar o ficheiro STL no software do equipamento de fabricação aditiva, existe a necessidade de escolher os parâmetros de impressão mais adequados ao modelo a construir.

Sendo dada a ordem de fabrico o software faz a conversão do modelo STL para código-G. O código-G é uma linguagem de programação no qual máquinas de fabricação usualmente são programadas. No fundo consiste no conjunto de instruções

que é dada à máquina sobre a forma como se move (caminho, velocidade, temperatura, rotação).

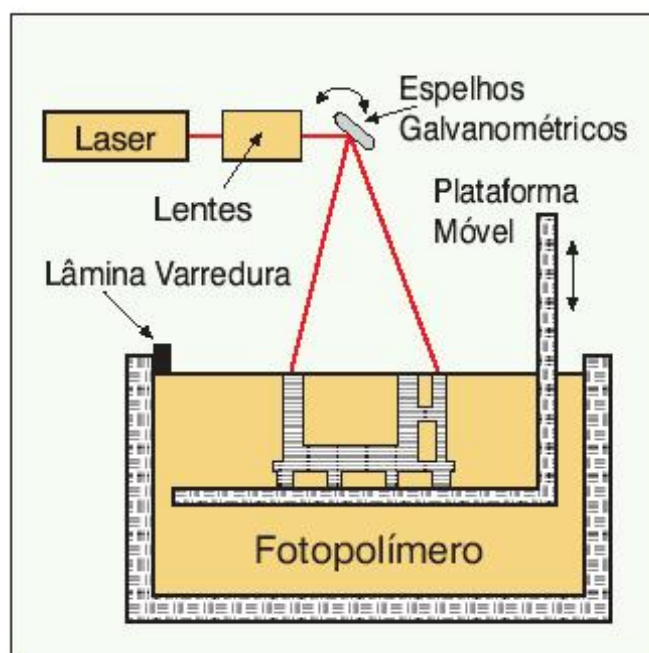
## 2.3. Principais processos de fabrico aditivos

### 2.3.1. SL-Estereolitografia

Esta tecnologia, mais conhecida por SL (Stereolithography), permite fazer a construção de modelos tridimensionais a partir de um polímero líquido sensível à luz que solidifica quando exposto a radiação ultravioleta.

O modelo é construído sobre uma placa situada abaixo da superfície de um banho líquido de resina epóxi ou acrílica. Uma fonte de raio laser ultravioleta faz o mapeamento da primeira camada, fazendo desta forma que a secção transversal do modelo solidifique deixando todas as outras áreas líquidas.

A placa é de novo submersa no banho de polímero líquido e o laser cria a segunda camada acima da primeira. O processo é repetido até o modelo estar completo. Existe a necessidade de introduzir o modelo num forno de radiação ultravioleta de forma a permitir fazer uma cura mais completa. A Estereolitografia foi a primeira técnica que apresentou bons resultados de prototipagem rápida [6].



**Figura 2-Exemplo dispositivo de Estereolitografia**

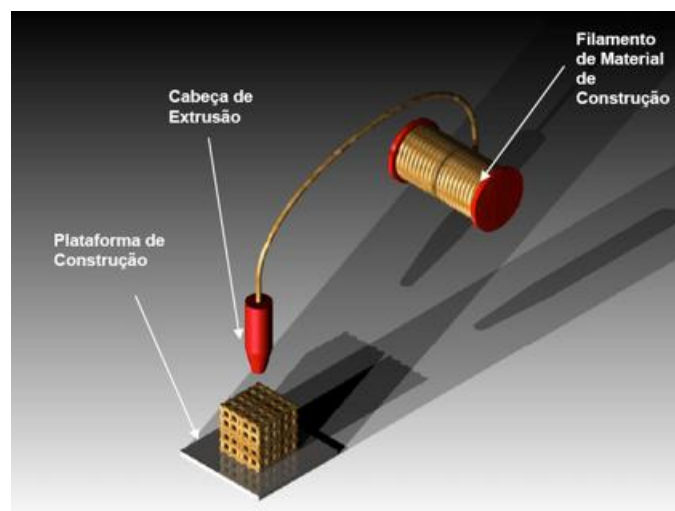
### 2.3.2. FDM- Modelação por deposição de material fundido

Neste tipo de tecnologia, de nome "Modelação por deposição de material fundido" ou FDM, um filamento de material plástico é forçado por uma cabeça de extrusão que se encontra à temperatura de fusão do material [7]. O material é depositado enquanto que o bico de extrusão e a plataforma se movimentam em X e Y de forma a mapear a primeira camada.

Assim que esta fica completa, o bico de extrusão sobe e inicia-se a criação de uma nova camada. O processo é repetido até que o modelo fique completo.

O material de suporte é criado conforme haja necessidade de apoio vertical na peça. O material de suporte pode ser do próprio material a ser utilizado ou caso o equipamento possua duas cabeças de extrusão, é feito de um polímero solúvel.

Dentro das diferentes técnicas aditivas disponíveis, o processo FDM tem-se distinguido dos restantes por ser uma tecnologia cujo custo de aquisição de equipamento é inferior.

**Figura 3-Modelação por deposição de material fundido**

### 2.3.3. LOM - Construção de objetos em lâminas

Esta técnica de fabrico, com o nome de "Construção de Objetos em Lâminas" (LOM), consiste no corte de camadas de material serem unidas entre elas com um adesivo de forma a criar o objeto pretendido. A matéria-prima consiste em papel laminado proveniente de uma bobine, sendo que o agente adesivo é ativado por calor. O recorte das várias camadas que vão constituir a peça final é feito através de um feixe laser de alta precisão.

Após o corte da primeira camada, a plataforma no qual esta se encontra baixa, e um colector avança uma nova tira de papel. Um outro rolo aquecido avança fazendo a cura do agente adesivo. Repete-se agora todo o processo, sendo adicionadas as camadas necessárias de papel.

Os modelos feitos em papel devem ser selados e revestidos de tinta ou verniz de forma a evitar danos provocados pela humidade. De momento já é possível aplicar esta tecnologia utilizando diferentes materiais como plásticos, cerâmicos e metais.

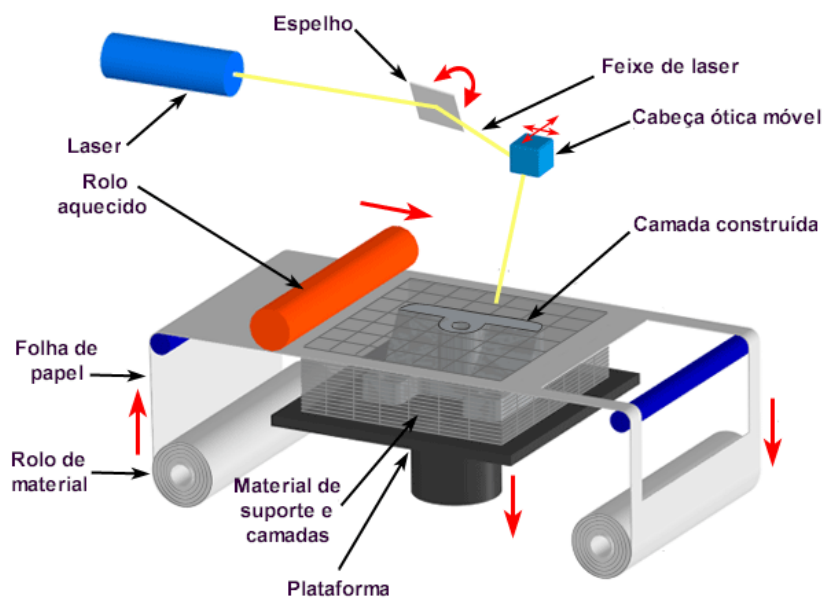


Figura 4-LOM- Construção de objetos em lâminas

### 2.3.4. Ink-Jet - Impressão por jacto de tinta

Esta tecnologia, de nome "Impressão por jato de tinta", utiliza tecnologia de jacto de tinta para criar peças.

O modelo é construído sob uma plataforma situada num recipiente preenchido com material sob forma de pó. Uma cabeça de impressão por jacto de tinta deposita seletivamente um agente ligante que funde e aglomera o pó nas áreas desejadas. O pó solto serve de material de suporte vertical para o modelo.

A plataforma baixa, é adicionado mais material sob forma de pó e o processo é repetido até todas as camadas estarem completas. É possível utilizar materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos.

### 2.3.5. SLS - Sinterização Seletiva a Laser

Esta técnica, com o nome de "Sinterização Seletiva a Laser" (SLS) utiliza um feixe laser para, de forma seletiva, fundir materiais pulverulentos, num objeto sólido. As peças são construídas sobre uma plataforma que se encontra imediatamente abaixo da superfície de um recipiente preenchido com o pó fusível (por calor).

Um feixe laser sintetiza a primeira camada na forma do objeto que se pretende obter. A plataforma desce ligeiramente, o pó é reaplicado e o laser traça a segunda camada. O processo repete-se até todas as camadas estarem terminadas. O pó em excesso dá suporte vertical à peça durante o fabrico [8].

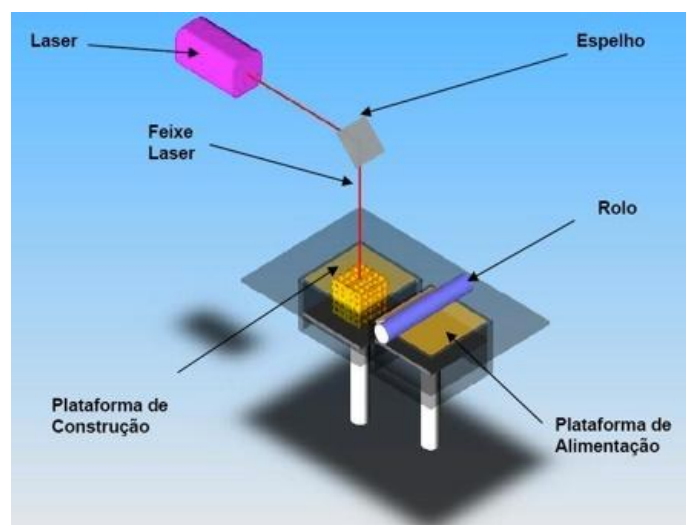


Figura 5-Técnica de sinterização seletiva a laser

## Capítulo - 3 - Método e Materiais

---

Diversos são os modelos encontrados na literatura de projeto de engenharia para o desenvolvimento sistemático do projeto de produtos.

Na maior parte das regras de projeto ocorre a indicação, passo a passo, sobre a maneira de como proceder e sobre os recursos que devem ser utilizados na resolução de determinados tipos de problemas.

Existem diversas metodologias e ferramentas que auxiliam o desenvolvimento de projetos, não há uma que seja indicada para todos os tipos de projeto. É necessário, portanto adaptar estas metodologias de acordo com o tipo de projeto a ser realizado.

Tendo em consideração as diferentes fases deste projeto, em seguida apresentam-se os objetivos principais que são abordados neste capítulo.

Assim sendo será abordada a temática das misturas das areias, quais os compostos utilizados na mistura, procedimentos da mistura, equipamentos utilizados e conclusões retiradas das respectivas misturas. Será também criado um molde a partir da mistura selecionada.

Posteriormente será descrito as etapas de desenvolvimento uma impressora 3D para moldes de areia, bem como as suas características principais

### 3.1. Wildlaser 1390LS Plus

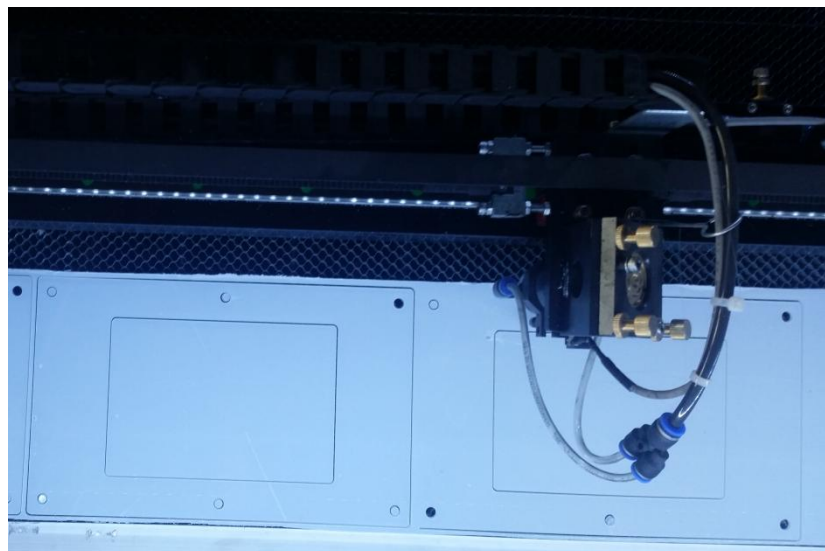
Máquinas e equipamentos cada vez mais eficientes que apresentam níveis de exigência e qualidade estão nas listas de prioridades das indústrias.

A Wildlaser 1390LS plus é uma máquina de corte a laser, máquina essa que será o ponto de partida para a realização deste projeto. Através desta máquina irá ser produzido todo o material de suporte ao processo experimental, bem como a criação de um molde experimental.



**Figura 6-Widlaser LS1390Plus**

Esta máquina apresenta várias funcionalidades, sendo as mais utilizadas a função de gravação e a função de corte.



**Figura 7- Corte a laser**

Na tabela seguinte apresentam-se as características da máquina:

**Tabela 1- Características Wildlaser LS1390 Plus**

<b>Tipo de Laser</b>	Tube Selado CO2
<b>Potência Laser</b>	RECI 120 W
<b>Tamanho Mínimo de Letra</b>	1mm x 1mm
<b>Velocidade Máxima</b>	Até 60.000mm / min
<b>Área Trabalho</b>	1.300 x 900mm
<b>Refrigeração</b>	Chiller Industrial a água
<b>Conectividade</b>	USB
<b>Software</b>	RDCAM

<b>Formato Ficheiros</b>	PLT,BMP,DXF, AI
<b>Dimensões</b>	1.370 x 1.780 x 1.100 mm
<b>Peso</b>	320 kg
Mesa de trabalho ajustável em altura, com gavetas de recolha; Entrada frontal e traseira para materiais de maiores dimensões e rolos; Ponto Zero com Red Dot; Sistema de extracção de fumos;	

### 3.2. Materiais utilizados para a mistura da areia

Para a realização deste projeto foi necessário realizar um estudo relacionado com misturas de areia, com o objetivo de determinar qual a proporção de areia, resina e endurecedor ideal para utilização na máquina de impressora 3D. Esta fase é muito importante uma vez que essa mistura, constitui a matéria de trabalho da máquina, e portanto é a matéria que vai ser utilizada para a conceção do molde.



Figura 8- Bancada de trabalho para a preparação de misturas de areias.

### 3.2.1. Areia, Resina e Endurecedor

As misturas realizadas durante o estudo têm como principais componentes a areia, a resina e o endurecedor.

#### 3.2.1.1. Areia

A areia tem uma extrema importância, estando esta presente na mistura em grande quantidade. A finura do grão tem de ser levada em consideração, uma areia mais grosseira requer menos ligante, tornando-se menos permeável, mas irá provocar um acabamento rugoso. Uma areia mais fina implica um acabamento bom mas necessita de mais resina e catalisador, devido á maior superfície específica.

A areia utilizada na mistura foi a areia revestida 50/20 [Anexo 1], da empresa Fundipor, Produtos para Fundição, Lda [9]. e tem como principais aplicações o fabrico de pequenos machos apresentando boas propriedades de desagregação após vazamento.

Na seguinte tabela apresenta-se as principais características mecânicas da areia revestida 50/20:

Tabela 2- Características areia revestida 50/20

Referência	Resistência Flexão a Quente	Resistência Flexão a Frio	Granulometria	Densidade
50/20	9-12 Kg/cm <sup>2</sup>	20-24 Kg/cm <sup>2</sup>	50-60 AFS	1,560-1,630

#### 3.2.1.2. Resina

A resina epoxídica ou poliepóxido, é um polímero termoendurecível, que polimeriza quando se mistura com um agente catalisador.

As resinas usadas são fenólicas, furânicas e misturas destes dois tipos. As resinas furânicas são compostas por furfurílico formaldeído e polímeros de ureia formaldeído enquanto as resinas fenólicas são polímeros fenol formaldeído, contendo alguns polímeros de ureia formaldeído para aumentar a resistência.

A resina utilizada na mistura foi a resina Sanset HB 031 [Anexo 2], da empresa Fundipor. Esta resina apresenta uma cor verde, de base ureia-formol para caixa quente.

É uma resina especialmente indicada para machos em peças de alumínio e latão (torneiras e acessórios).

A adição de Conservador KP 64 (10% sobre o peso da resina) facilita a desagregação dos machos e aumenta a vida de bancada e fluidez da areia.

Mistura típica:

- 100 Kg de areia seca 50 AFS
- 0,5 Kg de Endurecedor AT 21
- 2 Kg de Resina Sanset 031

### ***3.2.1.3. Endurecedor***

A nível de catalisadores ou de agentes de endurecimento, o número de produtos disponíveis comercialmente é muito extenso, mas a sua escolha depende de fatores como o custo, a facilidade de utilização, tempos de cura e as propriedades mecânicas, químicas, térmicas e elétricas do produto após cura.

Em conjunto com as características de cada agente endurecedor utilizado, convém ter em consideração que as temperaturas e os tempos de cura usados têm sempre um papel fundamental nas propriedades finais da resina.

Neste processo foi então utilizado o endurecedor AT21 [Anexo 3], da empresa Fundipor, que é composto por uma solução aquosa de ureia, sais de amónio e outros aditivos.

Tem como principais objectivos servir de catalisador para resinas de caixa quente especialmente Sanset HB 031.

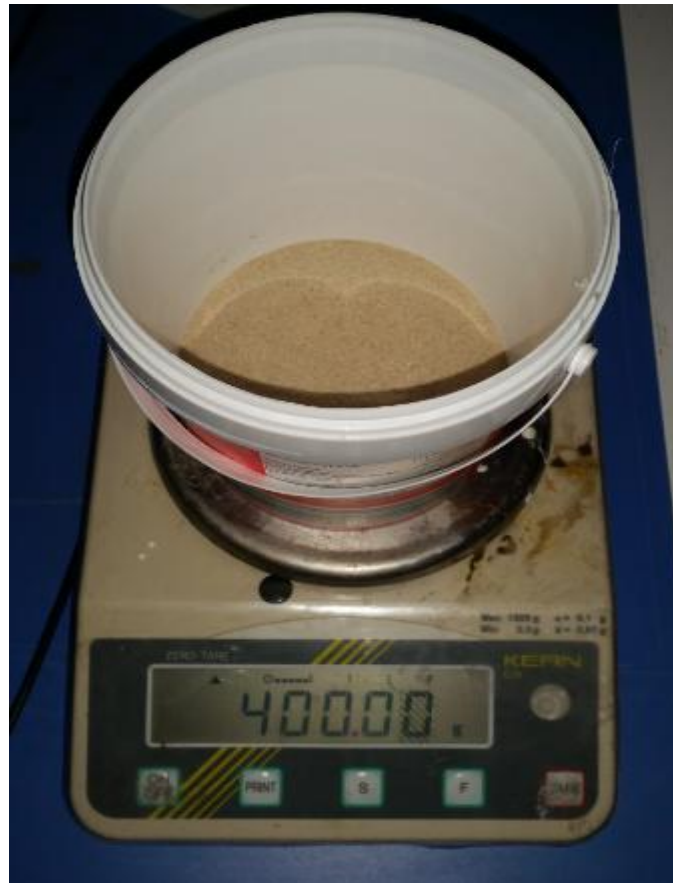
### ***3.2.1.4. Seleção mistura de areia***

O critério de seleção da mistura da areia foi baseado segundo os seguintes parâmetros:

- Homogeneidade da mistura;
- Textura da areia;
- Grau de humidade da mistura;

- Resistência da mistura.

Para que fosse possível atingir estes parâmetros foram realizados vários testes com várias proporções de areia resina e endurecedor. Para isso foram utilizados alguns equipamentos como balança e recipientes para a pesagem como se demonstra na seguinte figura.



**Figura 9-Processo de pesagem de areia**

No caso concreto a mistura que apresentou melhores condições para a experiência foi a seguinte:

**Tabela 3-Constituição da mistura**

Mistura	Areia [g]	Resina [%]	Endurecedor [%]
M1	400	0,062	0,025

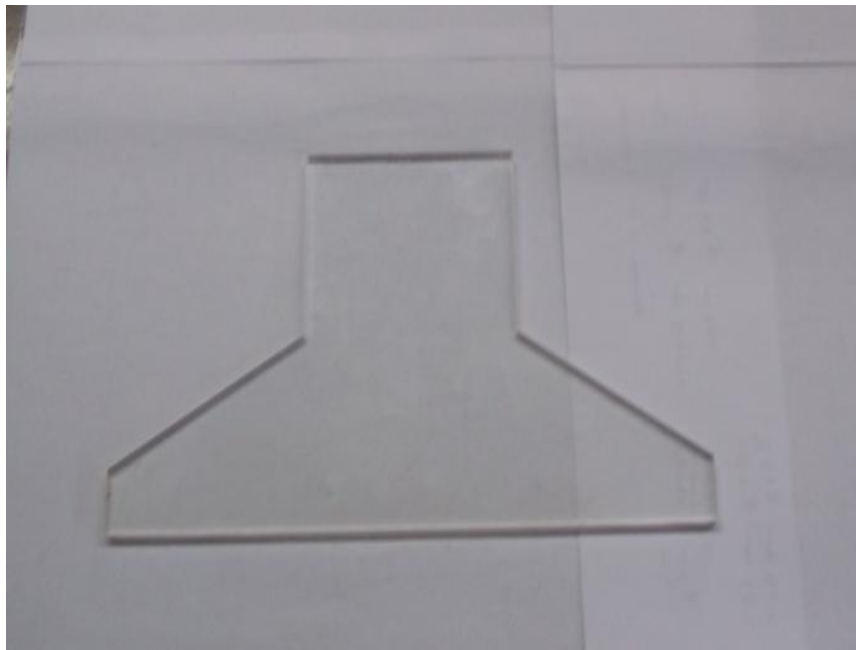
De salientar também que após realizar a mistura várias vezes, chegou-se á conclusão que após aguardar sensivelmente 30 minutos dentro do recipiente, a areia começou a perder a humidade da resina e do endurecedor, o que revelou ser bastante

importante uma vez que quando for necessário espalhar a mistura manualmente camada a camada esta não irá conter impurezas nem formar pequenos detritos que podem prejudicar a deposição da mesma.

### 3.2.2. Ferramentas desenvolvidas

Para se determinar as características técnicas do processo proposto, é importante conhecer os materiais utilizados, bem como a forma como foram processados. Para iniciar o processamento do material foi necessário definir previamente determinados parâmetros e efetuar certas tarefas.

Relativamente aos equipamentos produzidos, estes foram feitos a partir do corte de placas em acrílico, devido ao seu baixo custo associado bem como a facilidade de manuseamento das mesmas.



**Figura 10- Corte placa de acrílico com 6mm de espessura**

O acrílico é classificado como um polímero termoplástico que apresenta as seguintes características:

- Transparência cristalina
- Boa dureza superficial
- Boa resistência química

- Estabilidade mecânica

Desta forma as ferramentas utilizadas foram inicialmente desenhadas com o auxílio de software CAD (solidworks), que foram gravadas em formato DXF e que por fim foram transferidas para máquina de corte a laser.

Entre os diversos componentes produzidos, estão espátulas de várias espessuras para o auxiliar na deposição correta e uniforme da mistura da areia. Foram produzidas também placas estruturais de forma a conseguir colocar as misturas de areia para a sinterização.



**Figura 11- Criação de espátulas através de Software CAD**

### **3.2.3. Parâmetros do processo de sinterização**

Após a seleção da mistura da areia, seguiram-se novas experiências para a escolha do processo de sinterização mais adequado à criação do molde

Estas experiências foram realizadas segundo três aspetos diferentes, que foram os seguintes:

- Percentagem de potência do laser;
- Velocidade de sinterização;
- Altura da camada de areia a sintetizar.

**Figura 12- Placa de experiência**

### ***3.2.3.1. Percentagem de potência de laser***

Um dos parâmetros mais importantes nesta fase do projeto, foi a escolha da potência do laser, uma vez que é através deste parâmetro que as camadas da mistura da areia irão fundir, ou seja, ficarão ligadas entre si.

Como já foi descrito anteriormente, o laser que foi utilizado para a experiência foi um laser de 120W de potência. Esta potência é assumida na máquina em forma de percentagem, percentagem essa que vai de 1% até aos 100% respectivamente.

Assim sendo, utilizou-se a mistura de areia selecionada, colocou-se em placas de ensaio, previamente construídas e iniciou-se o processo de sinterização com diferentes percentagens de potência como se ilustra na seguinte figura.

**Figura 13 - Sinterização de amostras.**

Como se pode verificar na figura13, as amostras sintetizadas apresentam texturas bastante distintas. A gama de percentagens, nesta amostra varia entre os 15% e os 65%, uma vez que foi neste intervalo que se registaram os melhores resultados.

Verificou-se também que a amostra que apresentou melhores qualidades, foi a amostra sintetizada com uma percentagem de potência de 38% conjugada com uma velocidade de 300mm/s, uma vez que foram conseguidas espessuras de sinterização de cerca de 0,5mm e com níveis de resistência pretendidos em comparação com as outras amostras.



**Figura 14 - Sinterização amostra a 38%.**

Para que fosse possível obter estes resultados, foi necessário conjugar a velocidade de sinterização com a potência do laser.

A máquina cujos testes foram realizados consegue atingir velocidades de 60000mm/min. Na realidade os valores utilizados nestas experiências foram substancialmente mais baixos.

A velocidade de sinterização não pode ser demasiado elevada, uma vez que conjugada com a percentagem de potência do laser, a amostra não fica sintetizada. De igual modo a velocidade de sinterização não pode ser demasiado baixa, uma vez que associada à percentagem de potência, as amostras ficam queimadas.

### 3.3. Produção do Molde Experimental

Para a realização do molde, após a seleção da mistura da areia, surgiu um problema relacionado com a altura de sinterização. Esse problema estava relacionado com o eixo Z da máquina de corte a laser uma vez que a cada nova camada de areia, teria de ser feito o incremento manualmente.

Para isso foram construídas placas de acrílico com várias alturas, de forma a conseguir efetuar testes de sinterização para determinar a altura necessária para fazer a sinterização camada a camada.

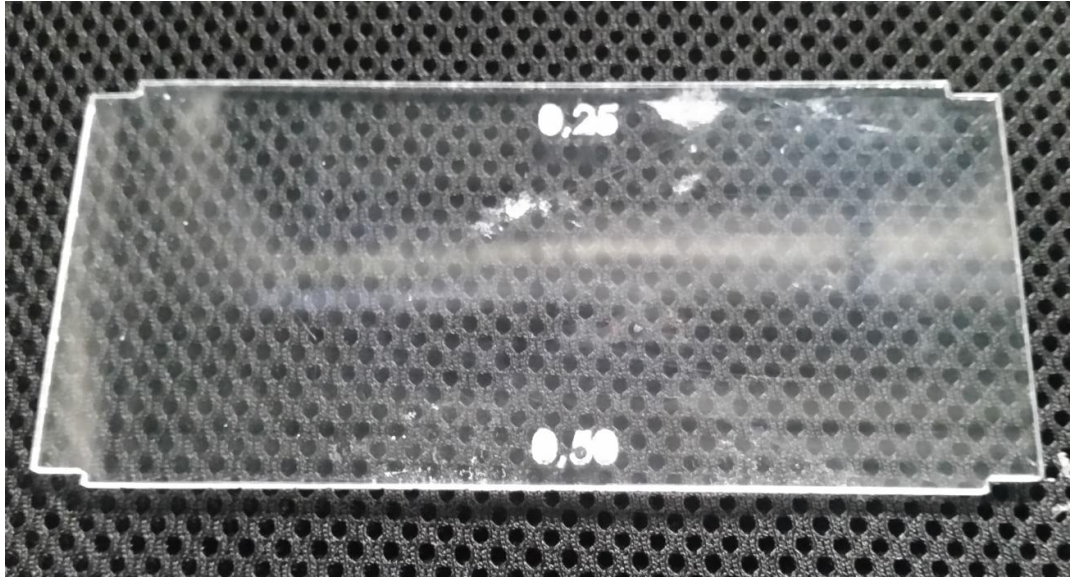


**Figura 15-Alturas de sinterização em mm.**

Como se verifica na figura15, foram marcadas várias alturas na placa de acrílico. A placa inicial tem uma espessura de 2mm, e as alturas foram marcadas com intervalos de 0,25mm.

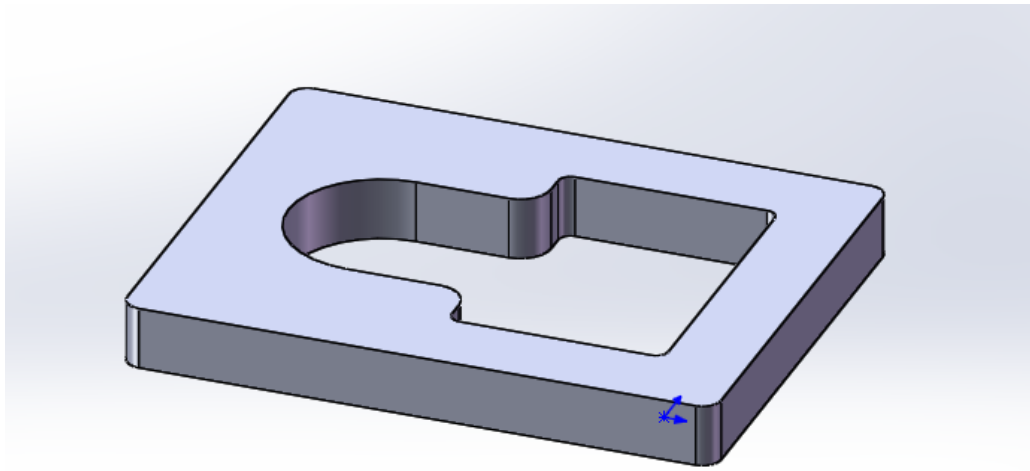
Através da construção destas placas foi possível indicar à máquina através da marcação do ponto zero a altura de sinterização pretendida que no caso concreto foi de 0,5mm.

Para garantir que as camadas de 0,5mm eram depositadas de forma correta, foram construídas espátulas com a altura indicada.



**Figura 16 - Espátula de 0,5mm.**

Em seguida, foi desenvolvido um molde com o auxílio de software CAD. Este molde teve como principal objetivo validar os processos e resultados obtidos nos teste da mistura de areia e nos testes de potência e velocidade do laser de sinterização. Trata-se de uma peça de forma simples e sem dificuldade geométrica, com objetivo de poder mostrar que é possível desenvolver e apurar ainda mais esta técnica.



**Figura 17 - Desenho CAD molde.**

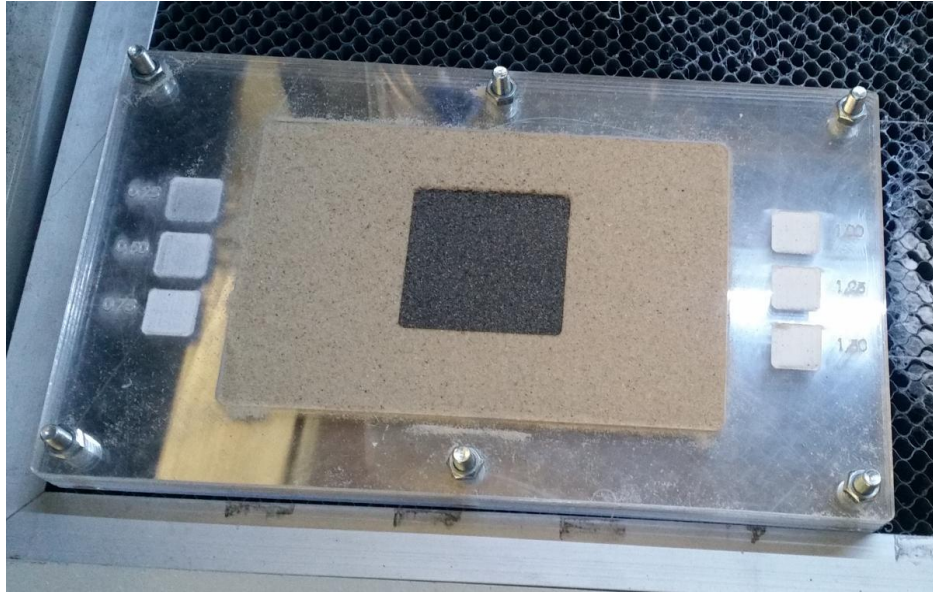
Ao iniciar o processo de sinterização, foi necessário proceder á montagem da estrutura desenvolvida para o molde. De salientar que todo o processo foi feito de forma manual com intuito de ser simples e prático. Assim sendo a montagem apresenta a seguinte constituição:

- Base em acrílico de 6mm;
- Placas da estrutura de acrílico com 2mm;
- Varão roscado M6;
- Porcas M6.



**Figura 18 - Montagem.**

O início da sinterização teve relacionado com a criação da base do molde. É através desta base que todo o molde irá ser construído. Esta base irá ter uma espessura de 5mm, o que significa a necessidade de utilização de três placas de acrílico. Sendo a altura de sinterização de 0,5mm o processo foi repetido 10vezes.



**Figura 19 - Sinterização laser base do molde.**

Depois de sinterizar a base do molde, deu-se início ao processo sinterização ao molde. Após de sinterizar os 5mm da base, para o restante molde foram sinterizadas mais 30 camadas o que perpez um total de 15mm.



**Figura 20 - Sinterização laser do molde.**

Com o processo de sinterização do molde completo, iniciou-se os trabalhos finais de acabamento e limpeza do molde.

Este processo requer algum cuidado, uma vez que se a limpeza do molde não for feita de forma adequada, poderá existir a possibilidade de danificar o mesmo. A limpeza foi feita com o auxílio de um pincel e de uma pistola de ar comprimido.



**Figura 21 - Limpeza do molde.**

Afim de validar o processo utilizado neste projeto, decidiu-se proceder ao vazamento de uma peça para o molde produzido.

Este vazamento surgiu como uma oportunidade de mostrar fisicamente o resultado final desta projeto.

Para a realização do vazamento foi selecionado o chumbo. O chumbo pertence á família dos metais, e a razão da sua escolha esteve relacionada com o seu baixo ponto de fusão, que é de aproximadamente 330°C.

Para poder transformar o chumbo em estado sólido, no estado liquido, foi necessário recorrer a uma série de equipamentos de auxílio tais como:

- Maçarico;
- Colher de vazamento;
- Equipamento de proteção individual.



**Figura 22 - Processo de fusão do Chumbo.**

Após obter o chumbo no estado líquido, procedeu-se ao vazamento do mesmo para o molde anteriormente produzido.



**Figura 23 - Processo de vazamento do chumbo.**

Depois da realização do vazamento do chumbo para o molde, foi feito o arrefecimento da peça até à temperatura ambiente.

Após a peça atingir a temperatura ambiente, precedeu-se á desmoldação da mesma.



**Figura 24 - Desmoldação da peça.**

### **3.4. Conclusão**

Podemos concluir através das experiências realizadas que utilizando os materiais:

- Areia 50/20;
- Resina Sanset HB 031;
- Endurecedor AT21.

A proporção de mistura deverá ser:

- 0.0625% de resina;
- 0.025% de Endurecedor.

Após a realização da mistura ela deverá ter um tempo de repouso de pelo menos 30 minutos, para que possa perder a humidade e seja mais fácil a sua aplicação em camadas finas.

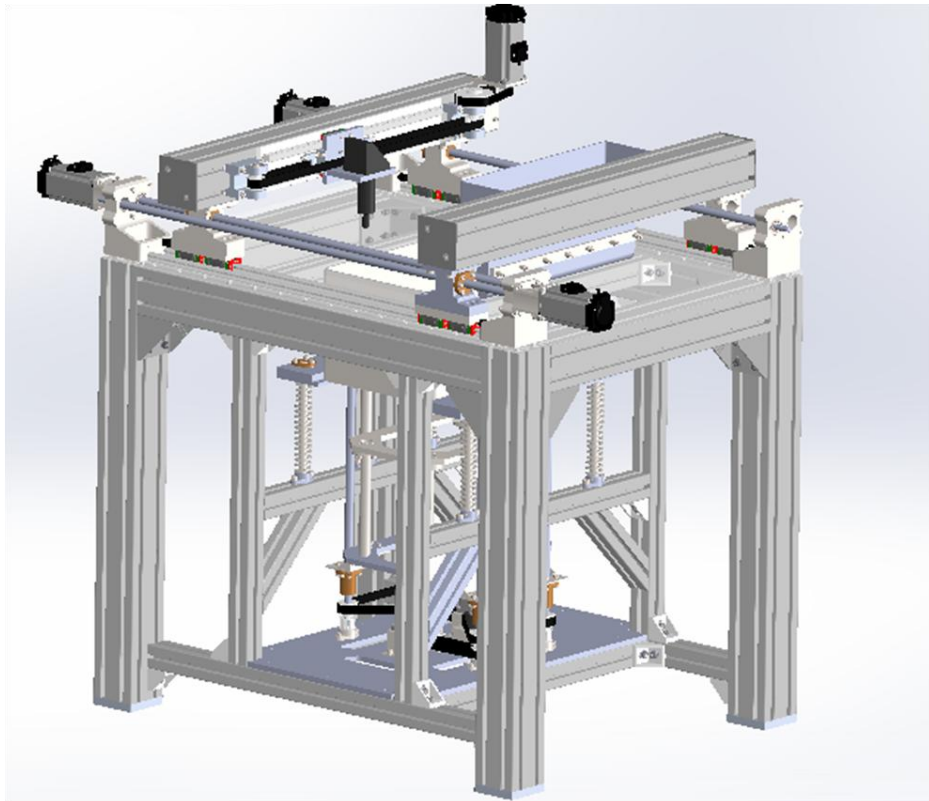
Utilizando um processo rudimentar, com pouco controlo das camadas de areia aplicadas e fazendo uso uma máquina de corta laser convencional, foi possível a produção de um molde de areia para fundição com sucesso.

## Capítulo - 4 - Caracterização da Máquina - Projetada

---

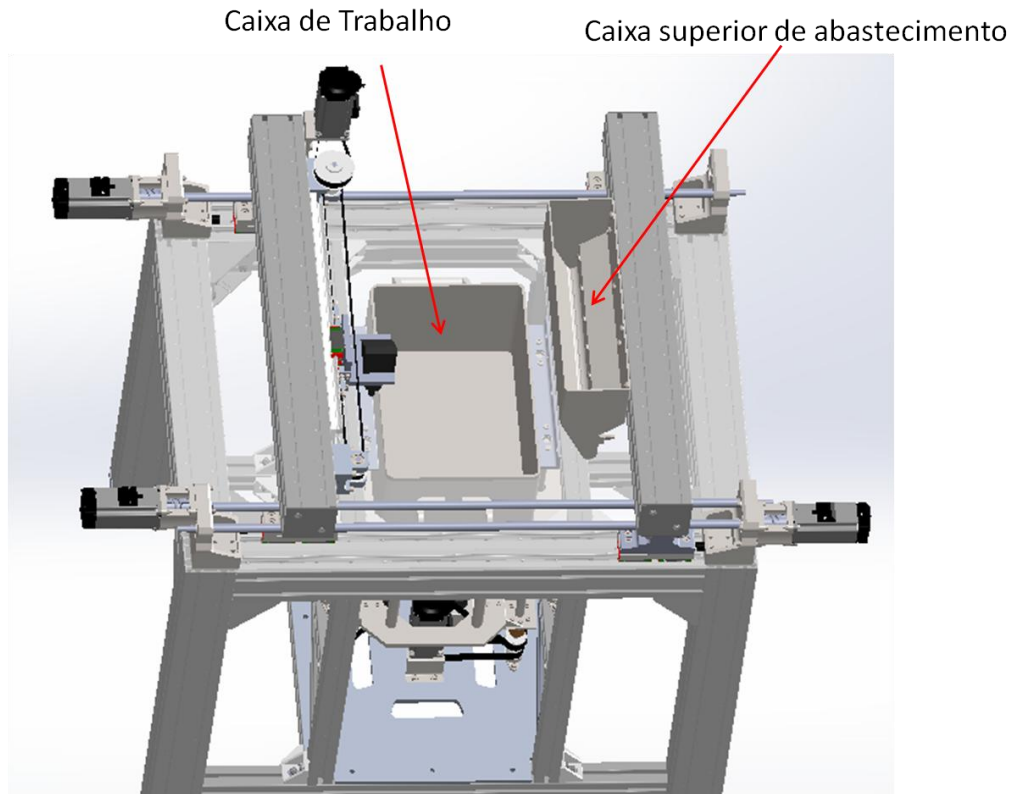
### 4.1. Apresentação

A máquina contará com aproximadamente 1371mm de comprimento, 833mm de largura e uma altura total de 1211.5mm. O peso total estimado será de 180kg.



**Figura 25 - Máquina Impressora 3D para moldes de areia.**

Possui um depósito de areia superior com capacidade para  $6.3 \text{ dm}^3$  de areia, que servirá para abastecer a caixa principal de trabalho por meio da deposição controlada da areia, camada a camada. A caixa principal tem  $400\text{mm} \times 260\text{mm} \times 200\text{mm}$  (CxLxA), com capacidade para  $20,8\text{dm}^3$  de areia.



**Figura 26 - Caixa de Trabalho e caixa de Abastecimento.**

A estrutura projetada é em perfil de alumínio extrudado, um material que confere resistência à máquina e ao mesmo tempo a torna mais leve, comparativamente ao aço por exemplo.

Elementos principais:

1. Laser;
2. Caixa Superior ou depósito de Abastecimento de areia;
3. Caixa de trabalho;
4. Conjunto de Elevação (eixo vertical);
5. 6. e 7. - Motores;
8. Estrutura
9. Base de assentamento da caixa de trabalho.

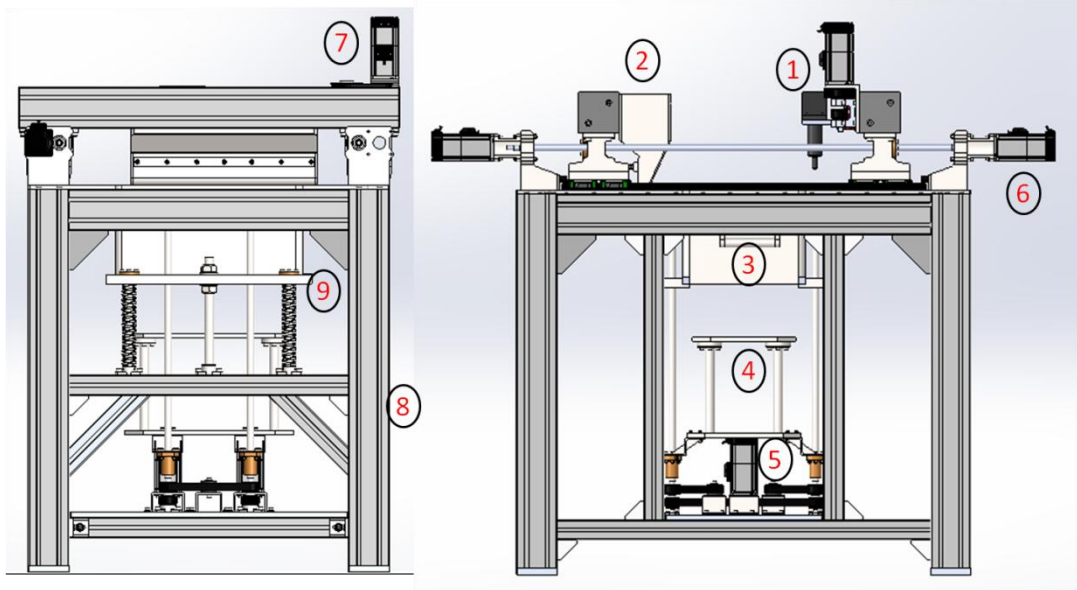


Figura 27 - Principais Elementos da Máquina.

#### 4.2. Funcionamento

Inicialmente o aro de elevação deverá estar na posição 1, (figura seguinte), colocando o fundo da caixa na posição mais elevada desta.

Com a mistura de areia no depósito superior, a máquina estará pronta a dar início ao ciclo trabalho.

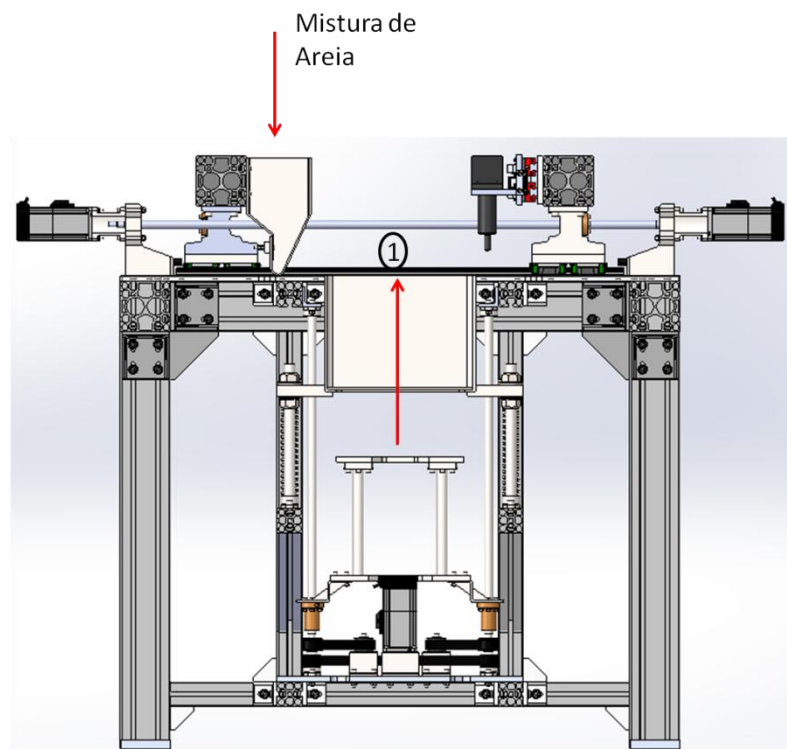
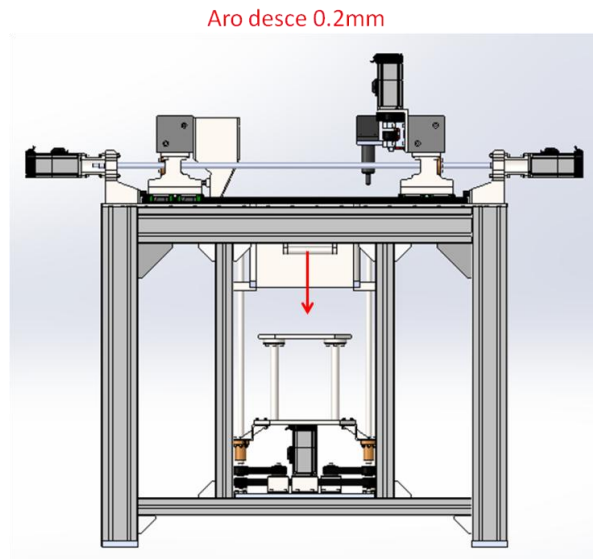


Figura 28 - Indicação de posição inicial de trabalho da máquina.

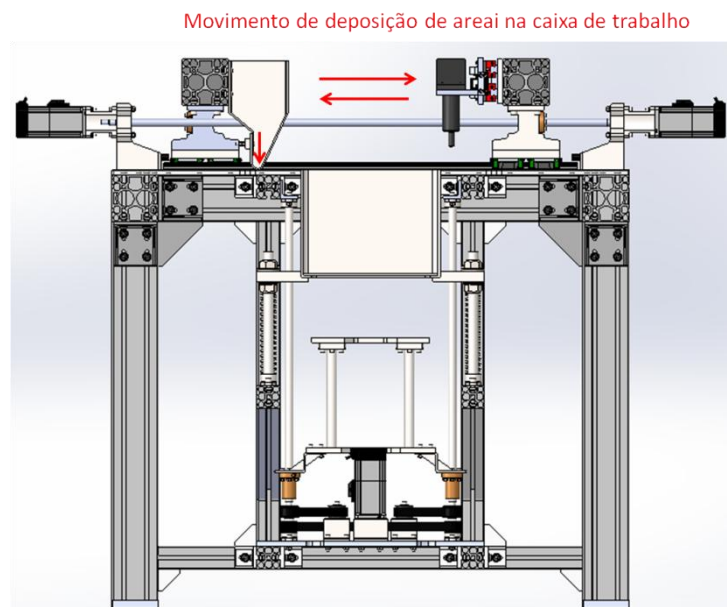
Início do ciclo:

Movimento 1 - Com o aro de elevação na posição mais alta, este irá descer apenas o correspondente à espessura de uma camada de areia desejada (ex: 0.2mm).



**Figura 29 - Movimento 1 - descida do aro de elevação.**

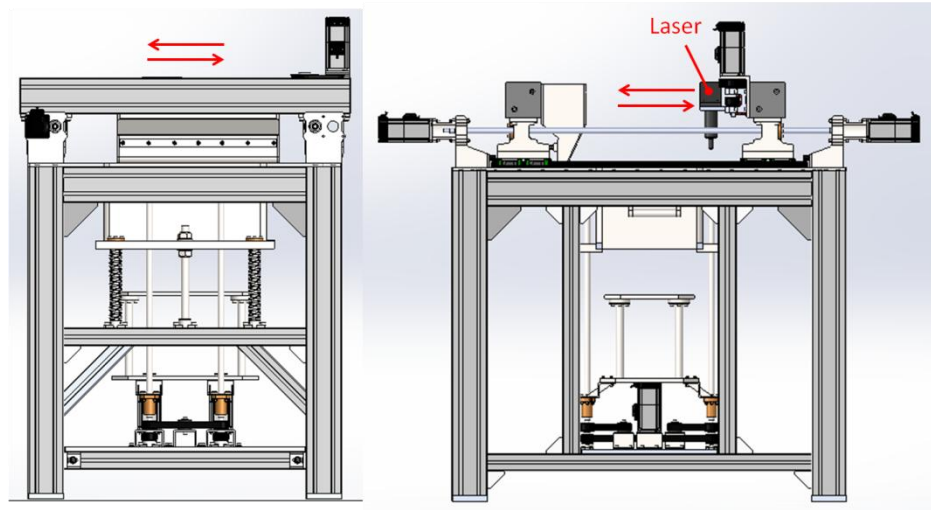
Movimento 2 - A caixa de superior avança fazendo o varrimento da caixa de trabalho e depositando uma camada de areia (0,2mm). Voltando de seguida para a sua posição inicial.



**Figura 30 - Movimento 2 - deposição de areia**

Movimento 3 - O Laser inicia o movimento, aplicando calor nos pontos específicos desejados de acordo com a programação feita, sinterizando a mistura de areia, resina e endurecedor. Após concluir a sinterização, o laser voltará à sua inicial.

Movimentos de Sinterização do Laser



**Figura 31 - Movimento 3 - Sinterização**

Seguidamente, o aro de elevação irá baixar mais 0.2mm dando-se início a um novo ciclo de trabalho da máquina. Os ciclos irão repetir-se até à conclusão do molde ou dos moldes que eventualmente estejam em produção.

## Capítulo - 5 - Dimensionamento da Máquina

---

### 5.1. Estrutura

Relativamente ao material da estrutura da máquina, tratando-se de uma máquina de dimensões relativamente pequenas e com a finalidade de fazer sinterização da areia através de um laser, foi selecionado perfil de alumínio por ser excelente à corrosão, leve, resistente (depende da sua secção) e conter excelentes propriedades para maquinação.

Para essa escolha e definição do material da máquina impressora, foram estabelecidas algumas características que a mesma deverá possuir:

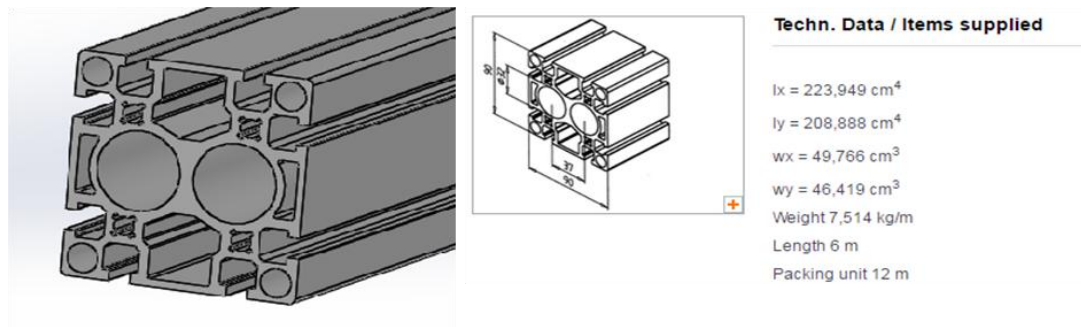
- Alta resistência mecânica;
- Fácil maquinação;
- Fácil montagem;
- Leve;
- Baixo custo.

De seguida apresentam-se alguns materiais que poderiam ser usados para a estrutura da máquina, bem como as suas vantagens e desvantagens:

Madeira (MDF): Baixo custo, fácil maquinação, fácil montagem e leve. Porém, baixa resistência mecânica;

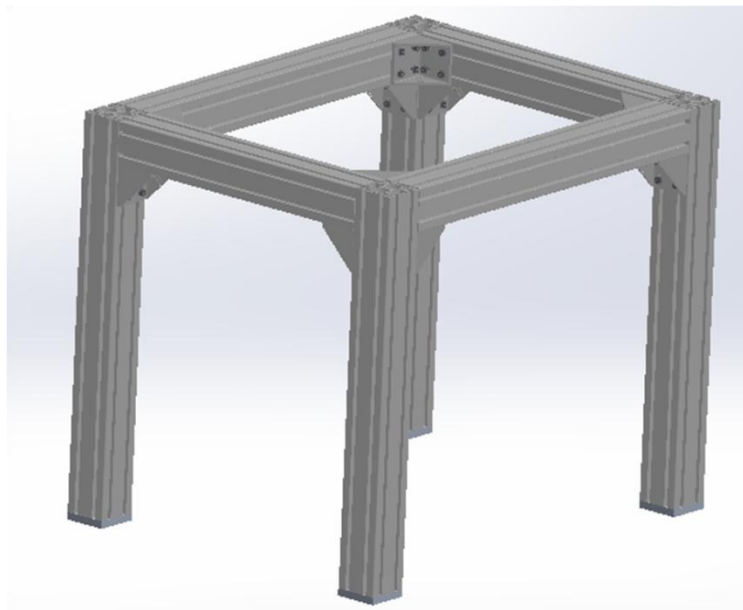
Perfis em aço: Alta resistência mecânica, difícil maquinação e montagem, pesado e custo médio;

Perfis em alumínio: Alta resistência, média maquinação e montagem, leve e custo médio.



**Figura 32 - Perfil em alumínio comercial (Minitec 90x90S).**

Este tipo de estrutura em máquinas ferramentas não é muito comum, mas é muito utilizado nas indústrias como estruturas de máquinas especiais e dispositivos. Por se tratar de uma máquina de impressão 3D é uma seleção que se adequa perfeitamente à máquina. O custo deste tipo de perfil não é alto, a facilidade de montagem é excelente e muitos fornecedores fornecem esse material cortado na medida com precisão.



**Figura 33 - Suporte base da máquina.**

## 5.2. Caixa de Areia Superior

A caixa de areia superior foi projetada em chapa de 3mm em aço S235JR, quinada e soldada.

Durante o desenvolvimento do depósito, levou-se em consideração a necessidade de considerar alguns problemas no escoamento da areia. Estes fenômenos podem, principalmente, levar à cessação do escoamento da areia pelo atrito entre seus grãos (como a cessação do escoamento da areia de um ampulheta). Para evitar isso, a caixa foi projetada de maneira que fosse possível a regulação da abertura onde sai a areia (Figura 34), com a utilização de uma régua na parte inferior. A sua configuração facilita a deposição das camadas de areia na caixa utilizando apenas a gravidade, ou seja sem auxílio de outro utensílio.

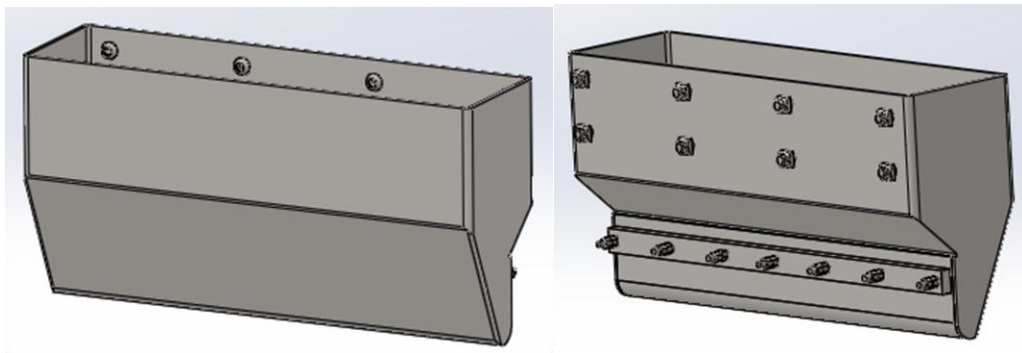


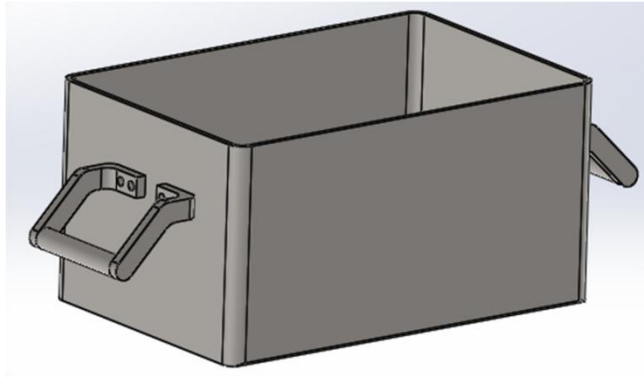
Figura 34 - Conjunto Caixa de Areia Superior.

O conjunto caixa de areia superior terá uma massa de 6,13kg, sem areia. Como referido anteriormente terá uma capacidade de  $6.3\text{dm}^3$  de areia.

## 5.3. Caixa de Trabalho

A caixa de trabalho é a área de trabalho da máquina, as suas dimensões são  $400\text{mm} \times 260\text{mm} \times 200\text{mm}$  (CxLxA), com capacidade para  $20,8\text{dm}^3$  de areia.

A caixa principal é feita com chapa de 3mm em aço S235JR, quinada e soldada também.



**Figura 35 - Conjunto Caixa de Trabalho**

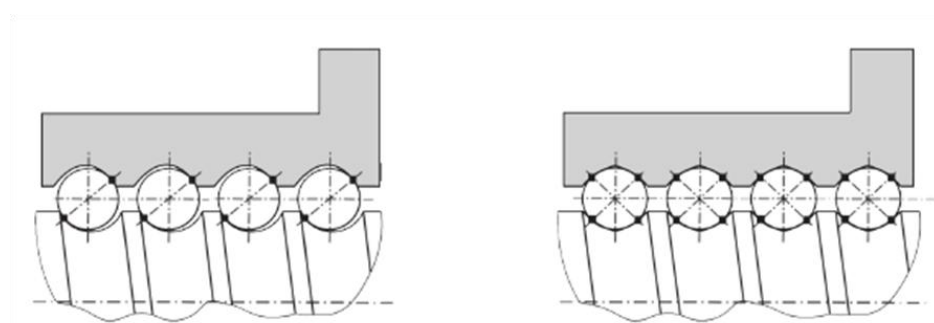
O massa do conjunto da caixa de trabalho será de 15,01kg, sem areia.

#### **5.4. Sistema de acionamento dos eixos de movimento**

Para toda a máquina, á exceção do eixo do laser, foi escolhido o sistema de acionamento por meio de fuso e porca de esferas.

Um sistema de fuso e porca de esferas consiste num atuador mecânico capaz de converter movimento angular em movimento linear. Baseia-se num veio no qual se encontra maquinado um caminho que permite a circulação de esferas e numa porca que possibilita a recirculação das mesmas.

Devido à ocorrência de contacto entre componentes mecânicos em apenas dois pontos de cada esfera (ou quatro pontos quando as esferas são sobredimensionadas para tal) (Figura 36), as forças de atrito geradas são reduzidas e como tal os rendimentos obtidos neste tipo de acionamento podem chegar aos 90%.



**Figura 36 - Contacto em dois ou quatro pontos por esfera num fuso e porca de esferas**

O fuso escolhido foi um fuso de Ø16mm, passo 5 e rosca direita de entrada única de referência R16-05T3-DEB da marca HIWIN, como se pode verificar pela figura seguinte.

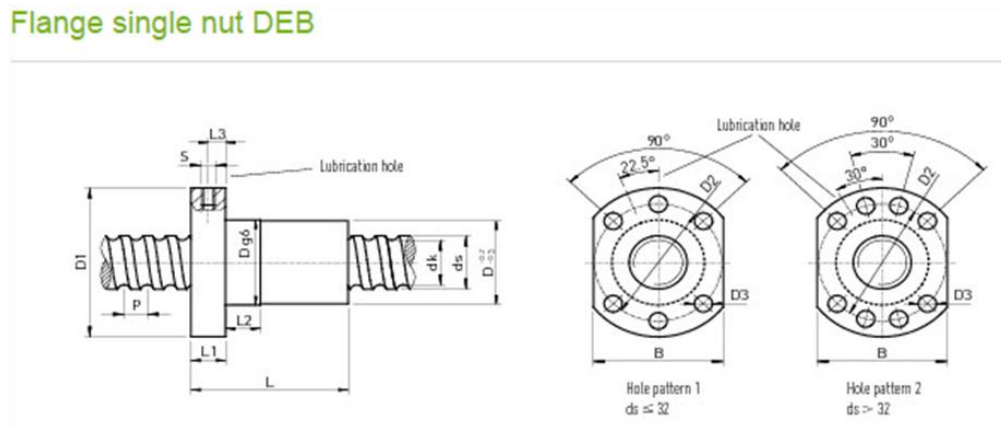


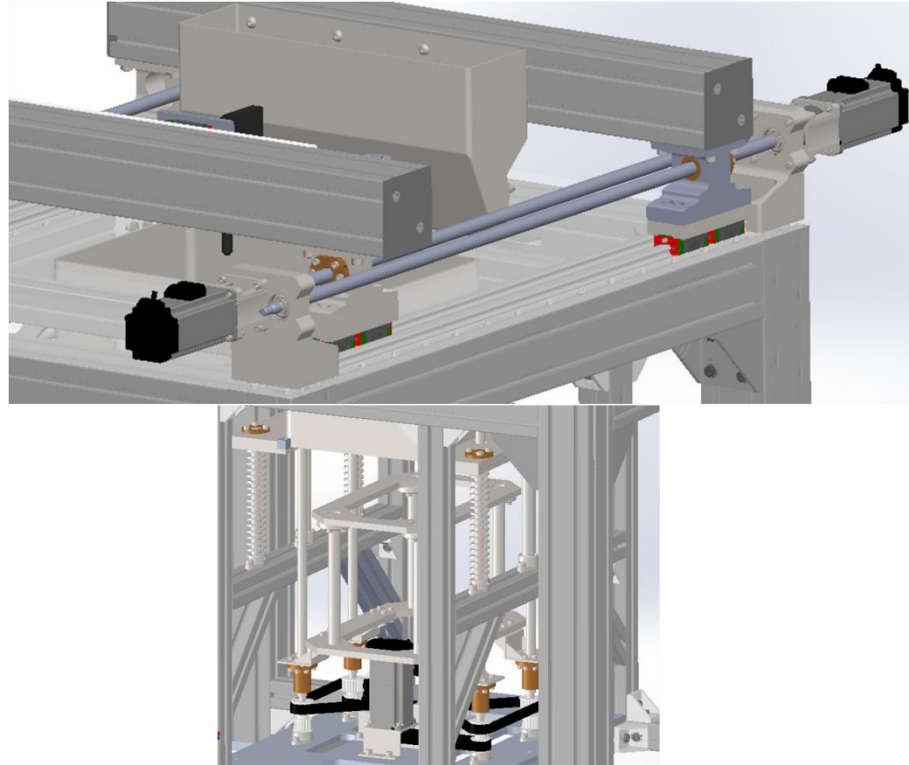
Figura 37 - Fuso e porca de esferas HIWIN.

As características e dimensões do fuso são apresentadas no quadro seguinte e podem ser consultadas também no anexo 4:

Article number	ds h6	P	D g6	D1	L	B	Dyn. load C <sub>dyn</sub> [N]	Stat. load C <sub>0</sub> [N]	CAD
R16-05T3-DEB	16	5	28	48	40	40	9600	12700	CAD
R20-05T4-DEB	20	5	36	58	52	44	13900	21800	CAD
R25-05T4-DEB	25	5	40	62	52	48	15600	27900	CAD
R25-10T3-DEB	25	10	40	62	65	48	24100	36200	CAD
R32-05T5-DEB	32	5	50	80	60	62	20700	43900	CAD
R32-10T4-DEB	32	10	50	80	85	62	40900	63200	CAD
R32-20T2-DEB	32	20	50	80	80	62	20300	26800	CAD
R40-05T5-DEB	40	5	63	93	69	70	22500	54600	CAD
R40-10T4-DEB	40	10	63	93	88	70	46800	82600	CAD
R40-20T2-DEB	40	20	63	93	88	70	23800	36400	CAD
R50-05T5-DEB	50	5	75	110	69	85	24900	69800	CAD
R50-10T4-DEB	50	10	75	110	98	85	52800	106800	CAD
R50-20T3-DEB	50	20	75	110	114	85	40000	76200	CAD
R63-10T6-DEB	63	10	90	125	120	95	84700	210800	CAD
R63-20T4-DEB	63	20	95	135	150	100	105000	250000	CAD
R63-20T5-DEB	63	20	95	135	175	100	125000	300000	CAD
R63-20K6-DEBH	63	20	125	165	170	130	245700	783300	CAD
R80-10T6-DEB	80	10	105	145	120	110	93400	269200	CAD
R80-20T4-DEB	80	20	125	165	160	130	135000	322000	CAD
R80-20T5-DEB	80	20	125	165	175	130	161500	398000	CAD
R80-20K6-DEBH	78	20	135	175	170	140	280000	720000	CAD
R80-20K7-DEBH	78	20	135	175	190	140	320000	820000	CAD

Tabela 4 - Dimensões do Fuso.

O comprimento roscado dos fusos dos eixo da caixa superior e do pórtico da cabeça do laser é de 925 mm, (montados na horizontal), enquanto que para caixa de trabalho foi projetado 4 fusos com 568mm de rosca.



**Figura 38 - Acionamento da Máquina por fuso e porca esférica.**

Esta gama de fusos admite velocidade máximas até 4375 rpm [equação 1], no entanto as dimensões do fuso podem condicionar este valor pois influenciam a velocidade ressonante (ou crítica) do mesmo. Define-se essa velocidade crítica como a velocidade angular à qual a deflexão do veio é máxima, ou seja, quando a velocidade do veio corresponde à frequência natural de vibração do sistema.

$$n_{max} = \frac{D_n}{d_s} \quad (1)$$

Em que:

$D_n$  - Valor da velocidade de trabalho para estes fusos esferas HIWIN -  $\leq 70000$ ;

$d_s$  - Diâmetro do Fuso [mm];

$n_{max}$  - Max Speed [rpm];

$$n_{max} = \frac{70000}{16} = 4375 \text{ rpm} \quad (2)$$

O fabricante define a velocidade crítica como :

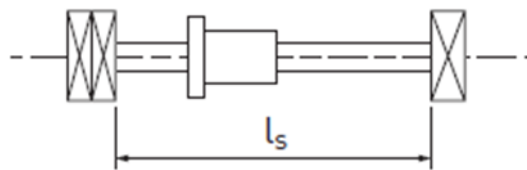
$$n_k = 2.71 \times 10^8 \left( \frac{f_n \times d_k}{l_s^2} \right) \quad (3)$$

Em que:

- $n_k$  - Velocidade crítica [rpm];
- $d_k$  - diâmetro da raiz da rosca do veio do fuso - Anexo 4;
- $f_n$  - coeficiente de velocidade crítica dependente do tipo dos apoio do fuso - figura 29;
- $l_s$  - Distancia entre os apoios do fuso - figura 30 - .

Fixed bearing – fixed bearing	$f_n = 1.0$
Fixed bearing – supported bearing	$f_n = 0.692$
Supported bearing – supported bearing	$f_n = 0.446$
Fixed bearing – no bearing	$f_n = 0.147$

**Figura 39 - coeficiente de velocidade crítica dependente do tipo dos apoio do fuso**



**Figura 40 - Distancia entre os apoios do fuso**

Para o presente caso, atendendo ao apoio fixo-suportado ( $f_n = 0.692$ ) e dimensões do fuso ( $d_k = 13.5 \text{ mm}$ ,  $l_s = 942.5 \text{ mm}$ ), a velocidade crítica é de 2839 rpm. O fabricante recomenda que a velocidade atingida em funcionamento não exceda 80% deste valor, ou seja 2271 rpm. O que tendo em conta o passo do fuso de 5 corresponderá a uma velocidade linear de 11355mm/min ou 0.189m/s.

Para o eixo da caixa superior, esse valor fica muito acima da velocidade que se prevê trabalhar, uma vez que a velocidade desse eixo deverá ser baixa para que se possa ter um maior controle sobre a camada de areia a depositar.

O valor do  $n_k$  ainda que já elevado poderá não ter muita influência no eixo do laser uma vez que a área de trabalho é relativamente pequena, mas também, há a possibilidade de utilizar lasers com mais do que 1 cabeça, o que limita assim a necessidade de movimentos desse fuso.

Quanto ao eixo da caixa de trabalho, os cálculos não estarão completamente corretos porque a disposição dos fusos são na vertical bem como o seu comprimento diferente. Mesmo assim esse valor corresponde a uma velocidade linear que se poderá considerar alta para a máquina em questão.

## 5.5. Porca

No dimensionamento de uma porca de esferas, dois dos parâmetros a ter em consideração dizem respeito à capacidade da porca suportar cargas axiais, quer em situações estáticas quer em dinâmicas.

Define-se a carga nominal estática de base  $C_o$  [Anexo 4], como a carga axial correspondente a uma deformação permanente de uma esfera e da rosca em cerca de 0.1 milésimas do diâmetro da esfera, no ponto de contacto de maior tensão. Define-se também a carga dinâmica nominal de base  $C$  [Anexo 4], como a carga axial que um fuso de esferas consegue teoricamente tolerar durante um milhão de rotações sem demonstrar sinais de fadiga.

Para a porca de esferas utilizada (R16-05T3-DEB), os valores fornecidos pelo fabricante são de 12.7N para a carga estática e 9.6N para a carga dinâmica.

O binário necessário para criar uma força no acionamento é dado pela equação 4.

$$T_a = \frac{F_w \times P}{2000 \times \pi \times \eta_1} \quad (4)$$

Sendo que,

- $T_a$  - binário aplicado no veio - [Nm];
- $F_w$  - força de avanço resultante do binário aplicado no veio - [N];
- $p$  - passo da rosca do fuso de esferas - [mm];

- $\eta_1$  - rendimento do acionamento.

Conhecendo o passo do fuso de esferas ( $p = 5 \text{ mm}$ ), considerando um rendimento comum para este tipo de acionamento (90 %) e aplicando a equação 4, obtém-se que para exceder a carga nominal dinâmica seria necessário um binário de  $8.49 \times 10^{-3} \text{ Nm}$  e de  $11.23 \times 10^{-3} \text{ Nm}$  para a carga nominal estática. Visto que o binário do servomotor escolhido R88M-G40030H-BS2 é de 1.3 Nm, como se pode verificar no anexo 5, a utilização deste servomotor pode considerar-se compatível com esta porca de esferas.

No eixo do Laser o acionamento escolhido foi por correia dentada e polias, devido ao pouco espaço existente para montagem do sistema de transmissão de potência, mas também pela facilidade e possibilidade de grandes variações de velocidade dadas pelo sistema de correias.

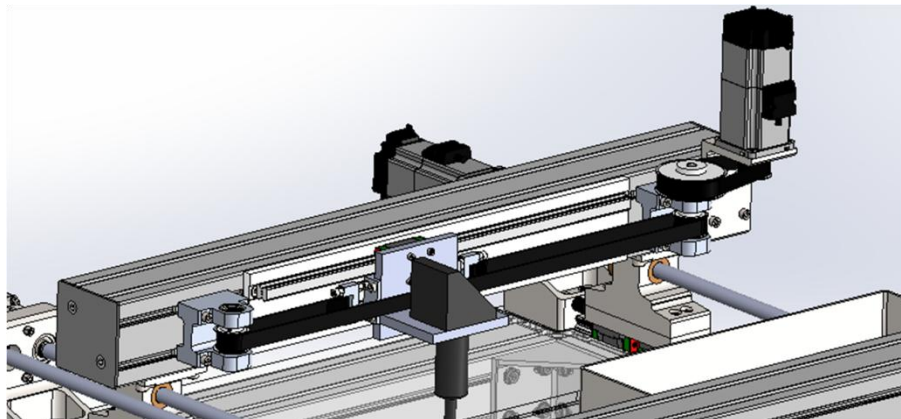


Figura 41 - Sistema de transmissão de potência - Eixo do laser.

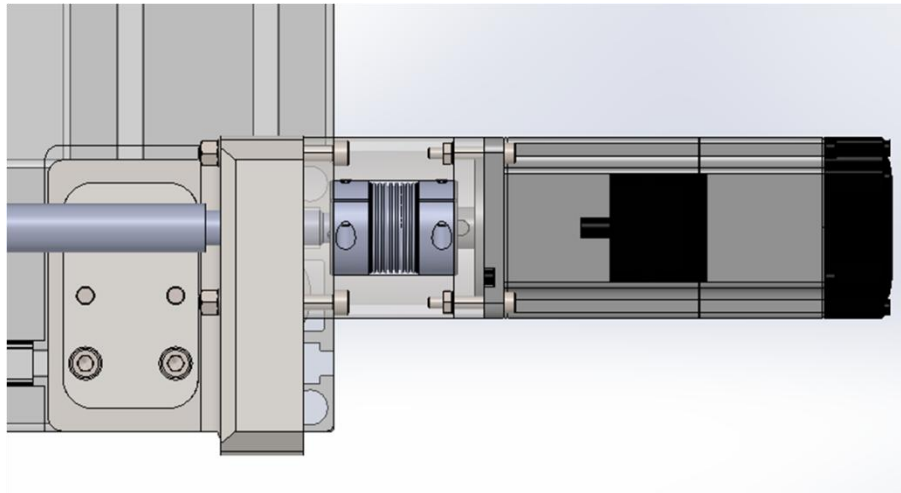
## 5.6. Acoplamentos

Após análise de algumas máquinas similares à que foi projetada, chegou-se à conclusão que o acoplamento deveria ser flexível. Pois permite o reajuste de pequenos desalinhamentos do motor com o fuso e ainda previne o controlo dos esforços aplicados, funcionando como um fusível mecânico. Assim optou-se por um acoplamento flexível GMT- FSCB32 feito em aço SUS303 e resistente a um binário máximo de 3Nm e rotação máxima de 4500 rpm [Anexo 6]. Sendo que o binário máximo disponibilizado pelo motor escolhido é de 1.3Nm e 3000 rpm podemos

concluir que este tipo de acoplamento é perfeitamente compatível, com o motor escolhido.



**Figura 42 - Acoplamento Flexível.**



**Figura 43 - Acoplamento flexível montado.**

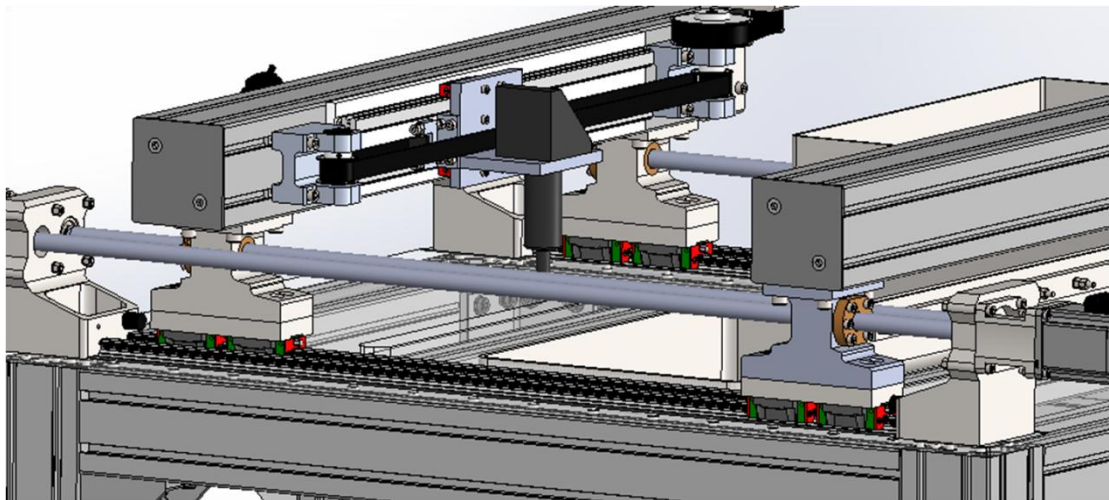
## 5.7. Guias Lineares

Nas máquinas de impressão 3D é importante a transmissão de precisão por parte dos motores às diversas partes mecânicas da máquina. Assim as guias lineares devem possuir o mínimo de folga mecânica, excelente rigidez e deslocamentos suaves.

As guias selecionadas, foram da HIWIN, em que o patim tem referência QHW15CC, traduz-se num patim da serie QH, de bloco quadrado, tamanho 15mm [Anexo 7], com possibilidade de ser montado horizontalmente ou verticalmente. É um patim de alta precisão usado nas máquinas industriais de precisão.



**Figura 44 - Série QHW - HIWIN.**

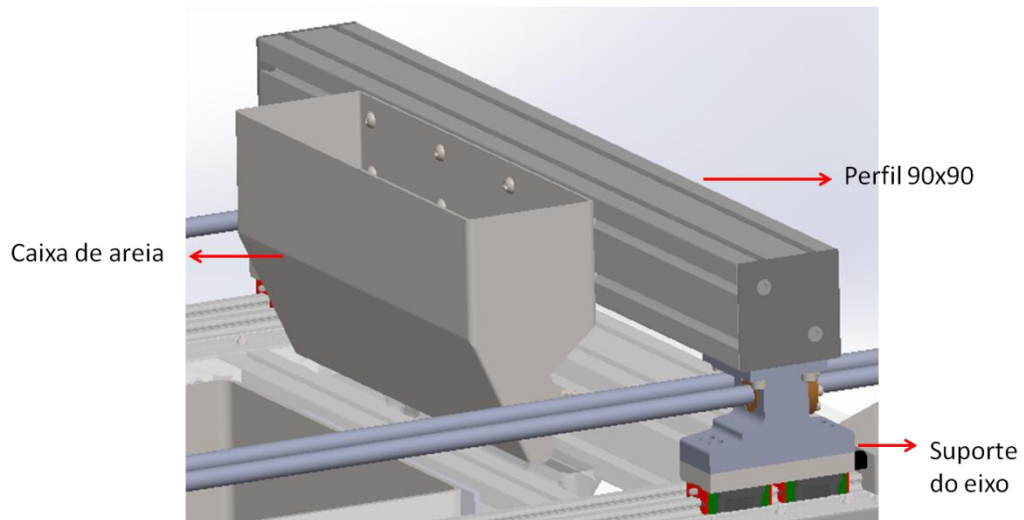


**Figura 45 - Montagem de Guias QHW15CC - HIWIN.**

É recomendado pelo fabricante que a carga máxima suportada pelas guias é de 13880N, carga dinâmica e 14360N estática.

#### **5.7.1. Calculo do Peso - Eixo da caixa Superior:**

O peso total suportado pelas guias do eixo da caixa superior será soma do peso do perfil mais o da caixa de areia completamente cheia, mais os apoios do eixo, como se indica na figura seguinte.



**Figura 46 - Indicação do eixo da caixa superior para cálculo do peso.**

Dados:

- Caixa Superior - Massa = 6.13kg [dado pelo software de desenho - solidworks];
- Capacidade da caixa - 6.3dm<sup>3</sup>
- Densidade da Areia 1.630kg/dm<sup>3</sup>
- Perfil 90x90x827mm em alumínio extrudado - Massa = 6.24g;
- Apoios em Aço S235JR - Massa = 3.04kg;

Sendo assim teremos que a massa de areia que a caixa poderá levar é de:

$$m = 1.630 \times 6.3 = 10.269kg \quad (5)$$

Massa total da caixa:

$$m = 10.269 + 6.13 = 16.4 kg \quad (6)$$

A massa total que as guias irão ser sujeitos é:

$$m_t = 16.4 + 6.24 + 3.04 \times 2 = 28.72kg \quad (7)$$

que equivale a um peso de :

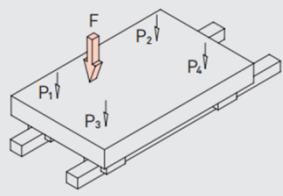
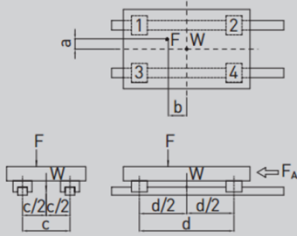
$$p = 28.72 \times 9.81 = 281.74 \text{ N} \quad (8)$$

De acordo com o fabricante a carga a que cada guia está sujeita é dada pela equação 9, de acordo com a figura 37:

$$P = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} + \frac{F \times a}{2c} + \frac{F \times b}{2d} \quad (9)$$

Em que:

- P - peso a que 1 guia estará sujeito[N];
- W - peso total sobre o conjunto de guias do eixo [N];
- F - Força do movimento/Outra força Emergente [N];
- a;b;c - distancias de aplicação da força F [m].

Table 2.3 Load on a block (examples of calculating load on a block)		
Typical examples	Distribution of load	Load on a block
		$P_1 = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} + \frac{F \times a}{2c} + \frac{F \times b}{2d}$ $P_2 = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} + \frac{F \times a}{2c} + \frac{F \times b}{2d}$ $P_3 = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} + \frac{F \times a}{2c} + \frac{F \times b}{2d}$ $P_4 = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} + \frac{F \times a}{2c} + \frac{F \times b}{2d}$

**Figura 47 - Exemplo de calculo da carga das guias.**

Tendo em conta que a força  $F = 0$  temos que:

$$P = \frac{W}{4} = \frac{281.74}{4} = 70.435 \text{ N} \quad (10)$$

Como se pode verificar esse valor encontra-se muito abaixo da capacidade de carga máxima das guias escolhidas. Podemos concluir que as guias são compatíveis com as cargas da máquina.

## 5.8. Motores

O dimensionamento dos motores fez-se para o eixo da caixa de trabalho visto ser o eixo onde se encontra o maior peso a ser movimento pelos motores e pelos fusos de esferas.

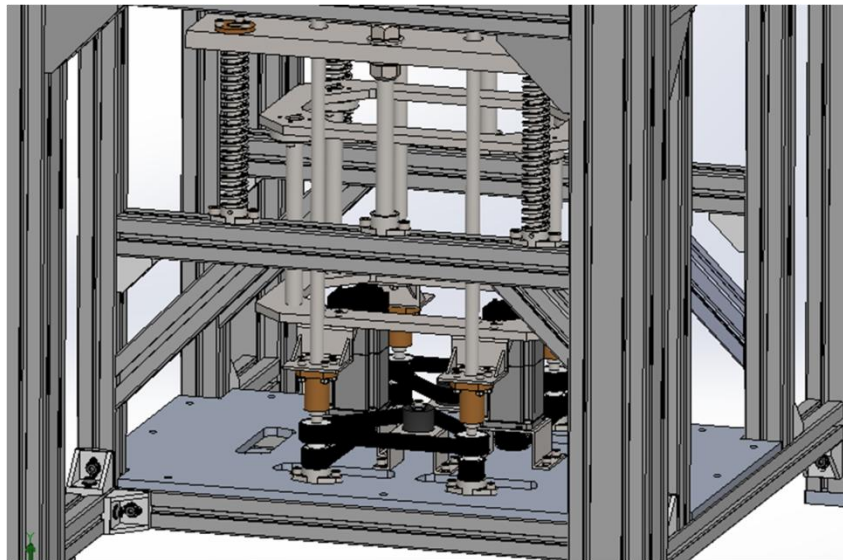


Figura 48 - configuração do eixo da caixa de Trabalho.

Dados:

- $L = 0,568\text{m}$
- $m = 46.34\text{kgf}$
- $g = 9.81\text{m/s}^2$
- $V_{\text{Max}} = 0,189\text{m/s}$
- $t_1 = 0.1\text{s}$

Sendo:

$L$  – Comprimento do fuso no eixo [m];

$m$  – Massa a ser deslocada no eixo [kgf];

$g$  – Gravidade [ $\text{m/s}^2$ ];

$V_{\text{Max}}$  – Velocidade máxima de deslocamento sem atrito [m/s].

A carga axial do fuso na vertical é dada pela equação:

$$F_a = (m \times g) + f + (m \times \alpha) \quad (11)$$

Sendo:

- $F_a$  – Carga axial durante a aceleração ascendente [N];
- $m$  – Massa Transferida [kgf];
- $f$  – Resistência da superfície da guia [N].

Antes de calcular a carga axial do eixo, foi preciso calcular a aceleração que é dada pela equação:

$$\alpha = V_{max}/t_1 \quad (12)$$

$\alpha$  – Aceleração [ $m/s^2$ ];

$V_{Max}$  – Velocidade máxima [m/s];

$t_1$  – Tempo de aceleração [s];

Assim a aceleração será igual a  $1.89m/s^2$

Para o cálculo da carga axial no eixo da caixa de trabalho utilizou-se a equação 13. Para esse caso não está sendo considerada a resistência da superfície da guia, por não haver guias neste eixo.

$$F_a = (46.34 \times 9.81) + 0 + (46.34 \times 1.89) = 542.178N \quad (13)$$

Para saber qual potência do servomotor que será necessária para elevar a carga do sistema utilizou-se a equação 14.

$$P = m \times V_{Max} \quad (14)$$

Sendo:

- $P$  – Potência [W];
- $m$  – Massa a ser deslocada no eixo [N];
- $V_{Max}$  – Velocidade máxima de deslocamento sem atrito [m/s].

Logo a potência necessária para elevar a caixa cheia de areia é:

$$P = 542.178 \times 0.189 = 102,5W$$

O motor escolhido, como se pode verificar pelo anexo 5 é perfeitamente compatível com os valores de carga aqui estudados.

Dados do motor:

Marca - OMRON;

Referência - R88M-G40030H-BS2

P = 400W;

T = 1.3Nm

N = 3000 rpm

### **5.9. Notas finais:**

Pode-se concluir que todos os componentes aqui dimensionados satisfazem os requisitos previstos tornando possível assim a construção da impressora 3D desenvolvida.

Para o eixo do laser foi projetado inicialmente a utilização de dois fusos de esferas e dois servomotores R88M-G40030H-BS2, o que após a realização dos cálculos de dimensionamento veio a verificar-se, ser necessário apenas 1 motor e 1 fuso, podendo o motor ser de uma gama mais baixa. Uma vez que a carga existente nesse eixo é muito pequena.

## Capítulo - 6 - Conclusão

---

Apesar de ainda não se ter a máquina de impressão 3D construída, foi possível testar a sua viabilidade, bem como apurar alguns parâmetros relacionados com o seu funcionamento e operação do laser, como potencia e velocidade. Do mesmo modo testou-se os parâmetros de funcionamento das matérias primas, areia, resina e endurecedor lançando bases sólidas e encorajadoras para a construção efetiva da Impressora 3D de moldes de Areia.

Com base nas experiências realizadas pode-se concluir que:

- A espessura das camadas de areia deverão ser mais baixas que 0.5mm, portanto 0.2 ou 0.1mm. Só é possível realizar esse valores numa máquina com movimentos controlados no eixo da caixa de trabalho, como a máquina aqui projetada.
- Possivelmente com a diminuição da espessura da camada será necessário reduzir para 20 a 25% a potencia do laser. O que permitirá maior controlo e precisão dos moldes produzidos.
- Neste projeto foi utilizado uma máquina com apenas 1 laser, mas já existe no mercado cabeças com múltiplos lasers, o que permite acelerar muito o processo de sinterização da areia, reduzindo consideravelmente o tempo de produção dos moldes.

Após a realização deste projeto pode-se que concluir que a sinterização a laser é uma tecnologia com uma potencialidade muito grande, mas ao mesmo pouco desenvolvida em Portugal.

Em suma, com o experiências desenvolvidas pudemos comprovar que é possível e, é viável, a construção de uma máquina de impressão 3D para moldes de areia.

## Capítulo - 7 - Referências

---

[1] - Ferreira, José M. G. de Carvalho, Tecnologia da Fundição, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1999.

[2] - Osório, António, Projecto Mobilizador RNPR - Rede Nacional de Prototipagem Rápida, revista O MOLDE, ano 12, nº29, Março 1999.

[3] - Oliveira, Eng.<sup>a</sup> Helena, Rapid Prototyping/Rapid Tooling em Fundição, Revista FUNDIÇÃO, Associação Portuguesa de Fundição, Nº215, pág.12-14, 3º trimestre, 2000.

[4] - Ferreira, J. M. G. C. Métodos de Tecnologias para o Fabrico Rápido de Protótipos na Indústria de Fundição Portuguesa, revista FUNDIÇÃO da Associação Portuguesa de Fundição, Nº204, pág. 6-9, 1º trimestre, 1997.

[5] - Aguiar, Paulo, Emprego de Técnicas de Prototipagem Rápida SLS à Industria de Fundição, 11º Congresso Nacional de Fundição, Porto, Novembro de 2001.

[6] - Alves, Fernando Jorge; Braga, Fernando J.; São Simão, Manuel; Neto, Rui Jorge L.; Duarte, Teresa Pereira, Protoclick! Prototipagem Rápida, Fevereiro de 2001.

[7] - Martins Augusto, Vitor, apontamentos da disciplina: Engenharia Assistida por Computador, do cursos de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. FEUP.

[8] - Jost, Peter, Selective Laser Sintering for Casting Applications, DTM GmbH, Hilden, 4<sup>th</sup> European SLS Users Group Meeting, Lycee Diderot, Paris Setembro 2000.

[9] - <http://fundipor.pt/> - Sitio na net da Empresa - FUNDIPOR - Produtos para Fundição, Lda. Consultado no dia 14-11-2016.

## **Capítulo - 8 - Anexos**

---

### **8.1. Anexo 1 - Ficha Técnica da Areia**

## **8.2. Anexo 2 - Ficha Técnica da Resina - SANSET HB 031**

### **8.3. Anexo 3 - Ficha Técnica do Endurecedor - ENDURECEDOR AT 21**

#### **8.4. Anexo 4 - Características do Fuso**

## **8.5. Anexo 5 - Características dos Motores**

## **8.6. Anexo 6 - Acoplamentos**

## **8.7. Anexo 7 - Guias HIWIN**

## **8.8. Anexo 8 - Alguns desenhos 2D - Impressora de Moldes 3D**