



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GUILHERME BERNARDO QUERINO

**PROJETO DE UM FORNO ELÉTRICO PARA FUNDIÇÃO DE
PEQUENAS PEÇAS DE METAIS NÃO-FERROSOS**

João Pessoa – PB
2019

GUILHERME BERNARDO QUERINO

**PROJETO DE UM FORNO ELÉTRICO PARA FUNDIÇÃO DE
PEQUENAS PEÇAS DE METAIS NÃO-FERROSOS**

Trabalho de Conclusão e Curso
apresentado à Universidade Federal da
Paraíba como exigência para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Koje Daniel
Vasconcelos Mishina

Q4p Querino, Guilherme Bernardo.

PROJETO DE UM FORNO ELÉTRICO PARA FUNDIÇÃO DE PEQUENAS
PEÇAS DE METAIS NÃO-FERROSOS / Guilherme Bernardo
Querino. - João Pessoa, 2019.

80 f. : il.

Orientação: Prof Dr Koje Daniel Vasconcelos Mishina
Mishina.

Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Fundição, Forno de fusão, Resistência elétrica. I.
Mishina, Prof Dr Koje Daniel Vasconcelos Mishina. II.
Título.

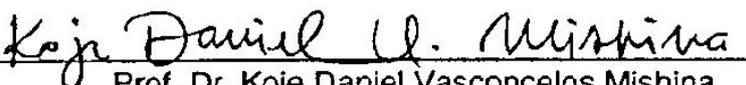
UFPB/BC

GUILHERME BERNARDO QUERINO

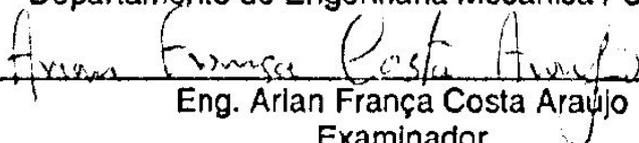
**PROJETO DE UM FORNO ELÉTRICO PARA FUNDIÇÃO DE
PEQUENAS PEÇAS DE METAIS NÃO-FERROSOS**

Trabalho de Conclusão e Curso
apresentado à Universidade Federal da
Paraíba como exigência para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Koje Daniel
Vasconcelos Mishina


Prof. Dr. Koje Daniel Vasconcelos Mishina
Orientador
Departamento de Engenharia Mecânica / CT / UFPB

Prof. Dr. José Gonçalves de Almeida
Examinador
Departamento de Engenharia Mecânica / CT / UFPB


Eng. Arian França Costa Araújo
Examinador
Mestrando pela Universidade Federal da Paraíba

*"Eu não sei o que quero ser, mas sei muito bem o que não quero me tornar."
- Friedrich Nietzsche*

Agradecimentos

Primeiramente, quero agradecer à Deus por todas as bênçãos que ocorreram na minha vida, sendo o meu guia e apoio durante as dificuldades, e sem Ele nada do que aconteceu seria possível.

Agradecer aos meus pais por todo o apoio e por todo o esforço que eles fizeram para que o pão e a educação nunca faltassem na minha vida e na vida da minha irmã, eles são meus exemplos de vida. Quero homenagear meu falecido avô Manuel (conhecido como Gega), realizando o seu sonho de ver seus netos formados. Nesse pequeno espaço não posso deixar de agradecer a minha companheira Thamires Araújo, que me deu forças nos momentos de tristezas e comemorou comigo momentos de alegria.

Também quero agradecer à equipe FÓRMULA UFPB, por ser o ponta pé inicial na minha carreira profissional, onde aprendi a trabalhar em equipe, gerenciamento e desenvolvimento de projetos. Agradeço ao FÓRMULA, nesses cinco anos de projeto, por ter feito amigos para a vida toda, entre eles Felipe, Arian, João Batista, Eufrázio, Rhaian, Milson, Daniel e José Matheus (vulgo jacaré). E também quero agradecer a Lucas Zago, João, Davi e Ramon pelo companheirismo durante toda a formação, deixando as horas vagas mais felizes. Por fim e não menos importante, agradeço ao meu coordenador de projeto e meu orientador, Koje Daniel, por todo apoio e incentivo em todos esses anos.

RESUMO

Este trabalho propõe os cálculos de dimensionamento de um forno de fundição de baixa capacidade para materiais não-ferrosos, vinculado ao projeto de extensão FÓRMULAUFPB da Universidade Federal da Paraíba. Uma vez que o alumínio vem sendo cada dia mais utilizado na indústria automobilística, este projeto tem a finalidade de auxiliar os membros com o conhecimento técnico de fundição e na confecção de peças para o protótipo. Desta forma, foi utilizado os conhecimentos adquiridos durante o curso para o dimensionamento das peças do forno. Foram feitos todos os desenhos técnicos para o prosseguimento da fabricação deste forno.

Palavras-chaves: Fundição, Forno de fusão, Cadinho, Resistência elétrica, isolamento térmico.

ABSTRACT

This work proposes the development of a low capacity casting furnace for nonferrous materials for the FÓRMULAUFPB extension project of the Federal University of Paraíba. Since aluminum has been used more and more in the automotive industry, this project has the purpose of assisting members in the technical knowledge of casting and in the making of parts for the prototype. In this way, the knowledge acquired during the course for the dimensioning of the oven parts was used. All technical drawings have been made for the further manufacture of this furnace.

Keywords: Foundry, Melting furnace, Crucible, Electrical resistance, thermal insulation

Lista de figuras

Figura 1- Fluxograma de processo de fundição em areia	19
Figura 2 - Efeito dos cantos na cristalização	20
Figura 3 - Representação esquemática do fenômeno de contração	21
Figura 4 - Ilustração das fases da moldagem em areia.....	23
Figura 5 - Ilustração das fases da moldagem em casca	24
Figura 6 - Equipamento utilizado para a moldagem sob pressão.....	25
Figura 7 - Ilustração das fases do processo de cera perdida	26
Figura 8 - Fluxograma do projeto do forno	38
Figura 9 - Cadinho Corona A/F	40
Figura 10 - Média teórica de armazenamento de calor por tonelada e kWh para alguns metais comuns	41
Figura 11 - Carga de superfície máxima recomendada	44
Figura 12 - Limites para passo e diâmetro das espiras.....	45
Figura 13 - Suporte refratário da resistência	46
Figura 14 - Equações para cálculo do isolamento térmico com três camadas.....	47
Figura 15 - Equações das temperaturas entre as diferentes camadas de isolamento	48
Figura 16 - Faixa do limiar de queimadura para contato da pele com superfícies lisas aquecidas de metal sem revestimento	48
Figura 17 - Disposição das camadas de isolamento	49
Figura 18 - Propriedades Físico/Químicas típicas.....	50
Figura 19 - Base do forno.....	52
Figura 20 - Diagrama esquemático do controlador PID	54
Figura 21 - Projeto final do forno	55

Figura 22 - Vista em corte da montagem do forno55

Lista de tabela

Tabela 1 - Propriedades dos cadinhos.....	27
Tabela 2 - Carga específica superficial (W/cm ²).....	29
Tabela 3 - Energia para elevar a temperatura a um valor desejado dos metais	30
Tabela 4 - Fatores de conversão em função da temperatura para KANTHAL A-1 e APM	42
Tabela 5 - Tabela de características dos fios Kanthal A-1 e APM.....	43
Tabela 6 - Cálculo do diâmetro externo do forno	51

Lista de símbolos

W/cm^2	Watts por centímetro quadrado
kWh/t	Quilo Watts horas por tonelada
kW	Quilo Watt
Ω	Ômega
α	Alfa
β	Beta
σ	Sigma
ε	Épsilon

Sumário

1. Introdução	16
1.1. Objetivos	17
1.1.1. Objetivo Geral.....	17
1.1.2. Objetivos específicos.....	17
2. Fundamentação teórica.....	18
2.1. Fundição	18
2.2. Cristalização	20
2.3. Contração de volume.....	21
2.4. Concentração de impureza	21
2.5. Desprendimento de gases	22
2.6. Processo de fundição	22
2.7. Moldagem em areia	23
2.8. Moldagem em casca.....	23
2.9. Moldagem sob pressão.....	24
2.10. Cera perdida	25
2.11. Fornos.....	26
3. Elementos construtivos do forno	27
3.1 Cadinho	27
3.2. Resistência elétrica.....	28
3.3. Transferência de calor	31
3.4. Condução	31
3.5. Convecção.....	32
3.6. Convecção Natural	33

3.6.1. Número de Nusselt	33
3.6.2. Número de Grashof	33
3.6.3. Convecção sobre superfícies.....	34
3.6.4. Número de Rayleigh	34
3.11. Radiação.....	35
4. Materiais e métodos	38
4.1. Desenvolvimento	39
4.1.1. Definição dos parâmetros	39
4.1.2. Dimensionamento da potência do forno e resistência elétrica	40
4.1.3. Sistema de Isolamento térmico.....	47
4.1.4. Sistema de basculamento.....	51
4.1.5. Sistema de painel elétrico	53
4.1.6 Produto final.....	55
5. Considerações finais	56
6. Bibliografia.....	57
Apêndice A	59
Apêndice B	60
Apêndice C	61

1. Introdução

Desde da idade da pedra o homem cria ferramentas para lhe auxiliar no seu dia a dia. No início da idade dos Metais o homem aprendeu a dominar os materiais metálicos através de técnicas de fundição, trazendo-lhe muitos benefícios. Foi possível a construção de ferramentas para agricultura e caça. Nesta época, também teve início das técnicas militares e a fundição foi o a principal forma para a produção de armas, originado as primeiras guerras. Onde o vencedor era aquele que possuía o melhor metal. Com toda a dificuldade e lentidão no aprendizado, as técnicas de fundição foram determinantes para o surgimento, desenvolvimento e desaparecimento de civilizações, isso teve uma enorme influência na vida do homem.

Nos dias atuais as indústrias de processamento de matérias primas visam o aumento de produtividade, redução de custos e desperdícios. Para atingir estes objetivos, pesquisas e desenvolvimento de tecnologias que agreguem valor na qualidade e redução de tempo, são as ferramentas utilizadas na indústria e no meio acadêmico.

Dos vários processos de transformação de matéria prima em produto acabado, temos o processo de fundição, que consiste em vazamento de metal líquido num molde com a geometria da peça desejada, reduzindo o desperdício de matéria prima. O processo de fundição demanda materiais específicos para a sua execução, os quais devem ter características de resistência térmica e estrutural, (MOREIRA, 2011).

Uma das desvantagens do processo de fundição na indústria são as grandes quantidades de energia para o processamento, sendo a térmica a mais utilizada. Para um maior rendimento energético são utilizados materiais com características refratárias ao calor, resistentes a ataques químicos e serem capazes de manter a integridade estrutural.

Dentre os metais que são utilizados para a fundição temos o alumínio que segundo a ABAL (2019), é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, mas é um material recente utilizado na industrial, tendo sua utilização em escala industrial somente em 1886. No Brasil, o alumínio teve sua utilização em escala industrial no ano de 1917, com a instalação da Companhia Paulista de Artefatos de Alumínio.

O alumínio por apresentar excelentes características como leveza, elevada condução elétrica, ótima relação resistência/peso, resistência a corrosão, reciclabilidade e ponto de fusão a uma temperatura mais baixa, comparada a outros metais. Por essas características o alumínio vem conquistando espaço no setor industrial, temos como exemplo, o setor automobilístico onde ele é aplicado em bloco de motor, caixas de câmbio, chassis, rodas e acessórios. Já na construção civil é aplicado em coberturas.

Por ser um material que tende a aumentar sua demanda, existe a necessidade de estudos sobre as técnicas de fabricação. Sendo o principal processo o de fundição. Em função do baixo ponto de fusão que o alumínio e suas ligas apresentam, o processo de fundição mais utilizado para este material é através da utilização de fornos elétricos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como finalidade, o dimensionamento de um forno de fundição de baixa capacidade para materiais não ferrosos.

1.1.2. Objetivos específicos

- Calcular a potência do forno com relação a quantidade de material;
- Calcular a resistência elétrica (diâmetro, comprimento e enrolamento);
- Dimensionar o isolante térmico para eficiência e segurança na operação;
- Utilizar o software de desenho assistido por computador, Solidworks.

2. Fundamentação teórica

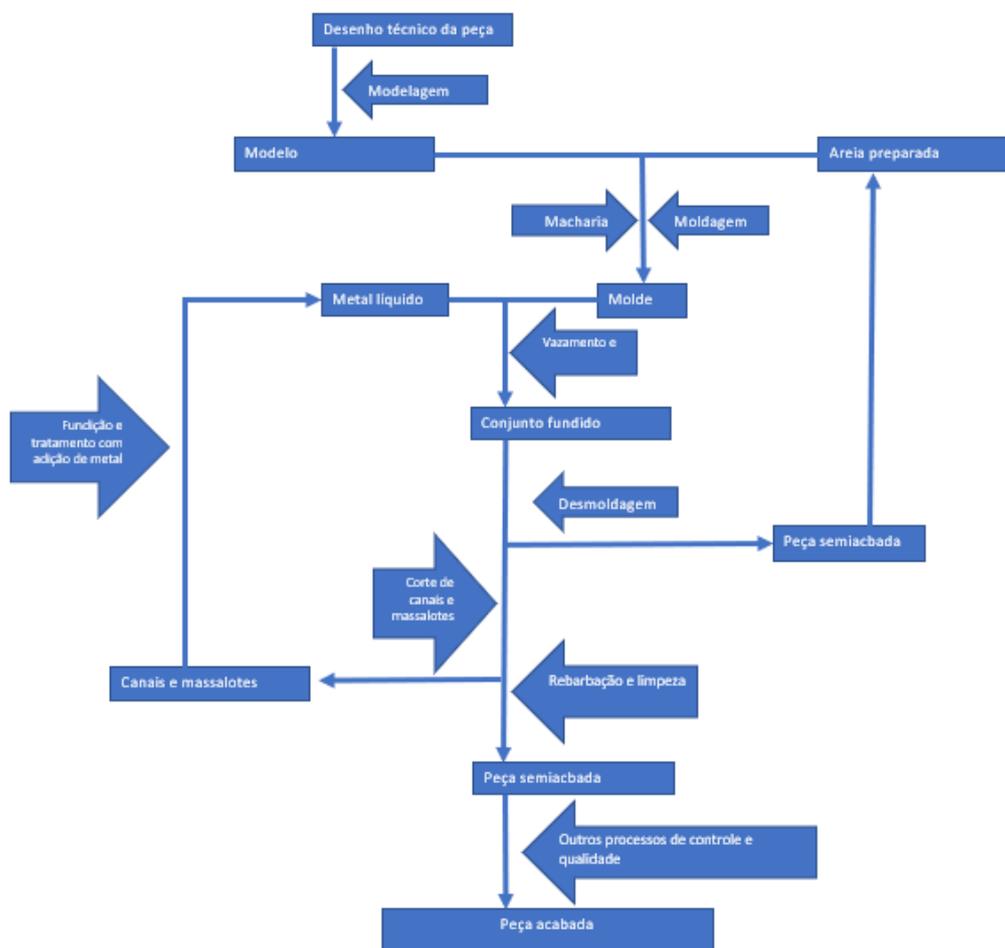
2.1. Fundição

Groove (2016) define fundição “como um processo no qual o metal fundido flui pela força da gravidade, ou por ação de outra força, num molde em que ele solidifica com a forma de sua cavidade”. O processo de fundição é utilizado pela sua versatilidade, que permite a fabricação de peças de alta complexidade, de pequenas e grandes dimensões e como desvantagem temos as limitações em propriedades mecânicas, baixa precisão dimensional e acabamento superficial (Groover, 1996).

Segundo Chiaverini (1977) a peça produzida por fundição, pode ter a forma definitiva ou não, podendo ser complexa, inclusive com detalhes internos. As peças solidificadas a partir do metal líquido pode ser submetida a trabalhos de conformação mecânica e usinagem obtendo novas formas a peça.

De maneira geral, o processo obedece a etapas básicas para conseguir uma peça fundida. O fluxograma da figura (1) demonstra as etapas do processo de fundição em areia:

Figura 1- Fluxograma de processo de fundição em areia



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A figura (1) demonstra um fluxograma simplificado das operações básicas para a produção de uma peça fundida, a qual pode ser aplicada a maioria dos processos de fundição.

Graças a característica do processo, a sua aplicação é amplamente utilizada nas áreas industriais. Segundo Baldman e Vieira (2014), este processo é economicamente atrativo, visto que apresenta o caminho mais curto entre a liga metálica fundida e a peça finalizada. Outra vantagem no processo é devido a sua versatilidade na fabricação de moldes e modelos, tornando a fundição o processo com a maior liberdade de formas disponíveis.

Durante o processo de fundição é importante o conhecimento dos fenômenos que ocorrem. Pois eles podem ocasionar o aparecimento de heterogeneidades, as quais, se não forem adequadamente controladas podem prejudicar a qualidade e

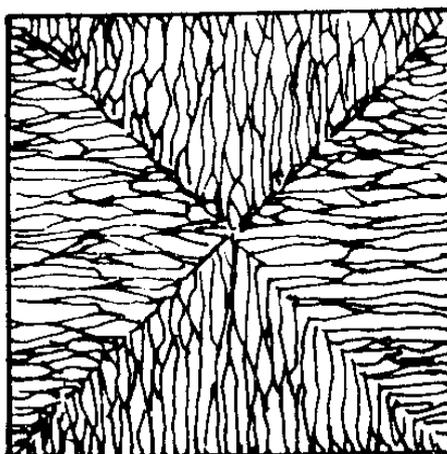
provocar sua rejeição das peças fundidas (Chiaverini, 1977). Os fenômenos são: cristalização, contração de volume, concentração de impurezas e desprendimento dos gases.

2.2. Cristalização

Segundo Callister (2002), na solidificação, os átomos vão se posicionar em um padrão tridimensional repetitivo, no qual cada átomo está ligado aos seus vizinhos mais próximos.

No processo de fundição, a solidificação tem início nas paredes com que o metal líquido está em contato. Os cristais formados e em crescimento sofrem a interferência das paredes do molde e dos cristais vizinhos que tendem a crescer mais rapidamente na direção perpendicular às paredes do molde. Originado uma estrutura colunar típica, até uma determinada profundidade, figura (2), essas estruturas se encontram segundo planos diagonais. O efeito indesejável é que essas diagonais constituem planos de maior fragilidade, que durante um processo de conformação pode surgir fissuras inutilizando o material (Chiaverini, 1977).

Figura 2 - Efeito dos cantos na cristalização



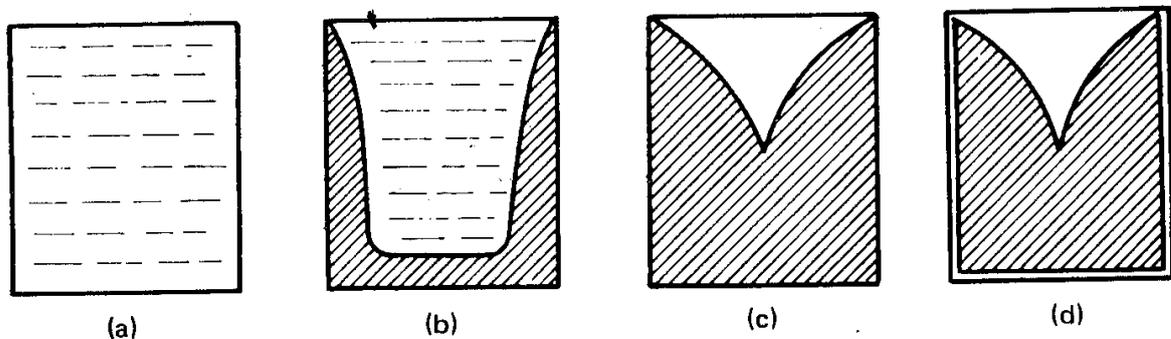
Fonte: Chiaverini (1977, p 2)

2.3. Contração de volume

Os metais, ao solidificarem sofrem uma contração e esta pode ser dividida em três tipos:

- Contração líquida – Abaixamento da temperatura e início da solidificação;
- Contração de solidificação – Variação do volume durante a mudança de líquido para sólido;
- Contração sólida – Variação do volume já no estado sólido, da temperatura de fim de solidificação até a temperatura ambiente.

Figura 3 - Representação esquemática do fenômeno de contração



Fonte: Chiaverini (1997, p 4)

Da figura (3), temos em (a) metal totalmente líquido; (b) início da solidificação nas paredes do molde onde a temperatura é mais baixa indo em direção ao centro da peça; (c) fim da solidificação; (d) contração sólida.

A diferença entre os volumes no estado líquido e no estado sólido final dá como consequência o *vazio* ou *chupagem* (Chiaverini, 1977).

Estes vazios podem ficar localizado na parte interna, próximo a superfície, não sendo visível externamente. Além disso, a contração pode ocasionar o aparecimento de trincas a quente e tensões residuais.

2.4. Concentração de impureza

Em ligas metálicas a impurezas são inerentes da sua fabricação, sendo assim normais na composição da sua liga.

Segundo Chiaverini (1977), ligas metálicas no estado líquido, as impurezas estão totalmente dissolvidas no líquido, formando um todo homogêneo. Ao solidificar, algumas impurezas são menos solúveis no estado sólido, assim esses elementos acompanham o metal líquido remanescente, acumulando na última parte sólida formada.

A concentração de impureza é chamada de segregação que tem como inconveniente composição química não uniforme, ocorrendo propriedades mecânicas diferentes ao logo da peça.

2.5. Desprendimento de gases

Este fenômeno ocorre quando o oxigênio dissolvido na liga tende a combinar com o carbono formando os gases de CO e CO₂ que escapam para a atmosfera, enquanto a liga está no estado líquido.

Quando a viscosidade da massa líquida diminui, devido à queda de temperatura, fica mais difícil a fuga desses gases, os quais ficam retidos nas proximidades da superfície das peças ou lingotes, na forma de bolhas (Chiaverini,1977).

2.6. Processo de fundição

Para Weiss (2017), o processo de fabricação industrial é o modo como determinado trabalho de construção e/ou transformação é realizado, geralmente, utilizando uma máquina de fabricação.

De acordo com Groover (1996) o processo de fabricação é um procedimento que objetiva realizar transformações físicas e/ou químicas no material inicial com objetivo de agregar valor a este material. Nos processos de fabricação metálicos são classificados como processo com remoção de cavaco e sem remoção de cavaco. O processo com remoção de cavaco temos a usinagem convencional e não convencional e no processo sem remoção de cavaco temos fundição, soldagem, metalurgia do pó e conformação mecânica.

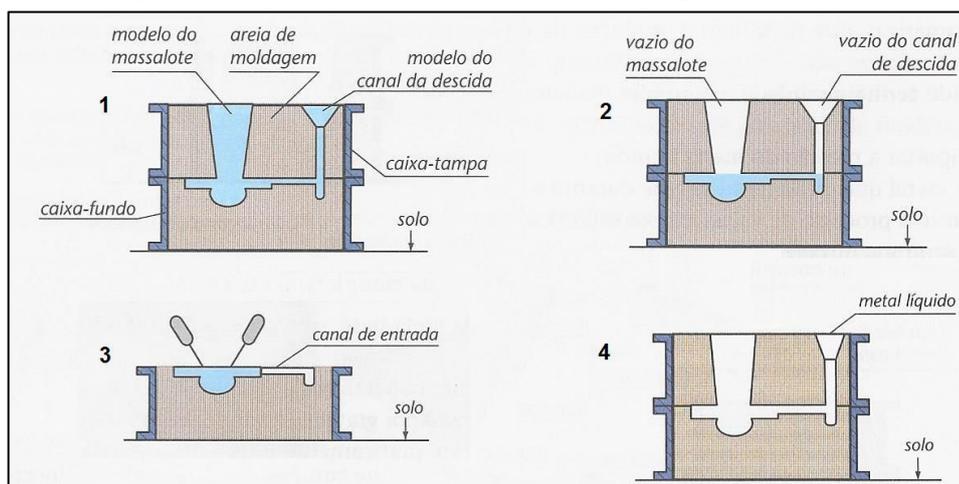
Segundo Almeida (2000), a produção de peças fundidas começa com a seleção do processo de fundição, o detalhamento do projeto e a especificação dos materiais.

Uma vez que todas essas etapas tenham sido vencidas, pode-se então partir para a fabricação de um lote de peças-teste, que se aprovado dará início a produção em larga escala.

2.7. Moldagem em areia

Torre (2004), diz que o processo de moldagem em areias, que é o processo mais comumente utilizado, utiliza-se de areia para a confecção do molde. Normalmente, para esse processo, é utilizado areia verde. A preparação do molde, neste caso, consiste em compactar mecanicamente ou manualmente uma mistura refratária plástica chamada areia de fundição, sobre um modelo montado em uma caixa de moldar. A figura (4) demonstra como é feita a caixa de fundição em areia.

Figura 4 - Ilustração das fases da moldagem em areia



Fonte: Adaptado de Novo Telecurso – Processos de Fabricação 1 (2009, p. 28).

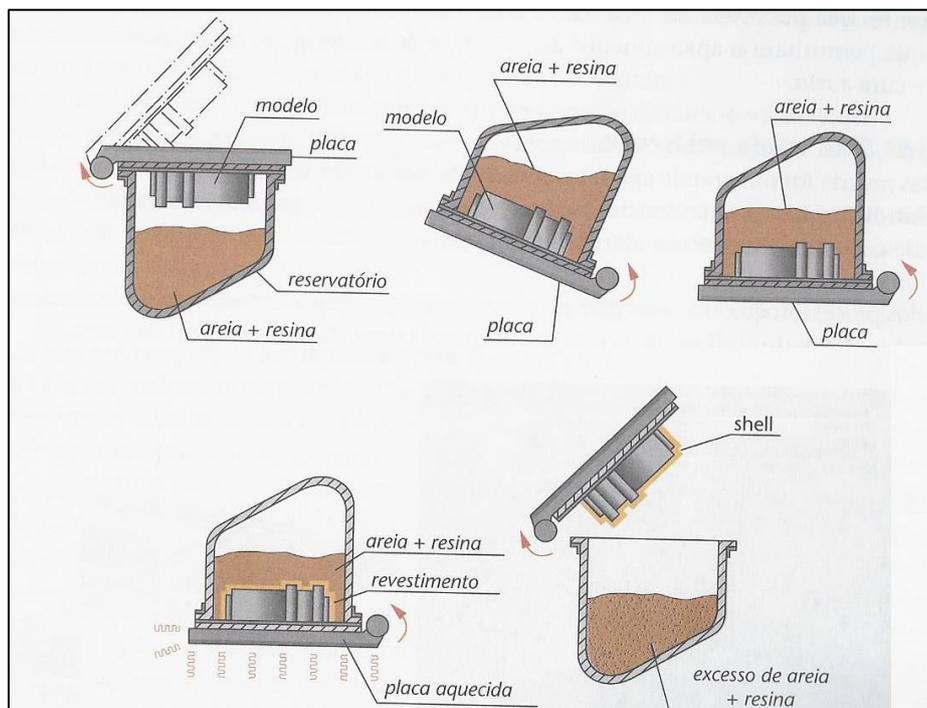
2.8. Moldagem em casca

Também conhecido como *Shell-moulding*, nesse método a areia é misturada com resina.

Segundo Torre (2004), o processo consiste em aplicar esta mistura de areia e resina sobre o modelo. Esta aplicação se dá através de uma máquina giratória, onde irá rotacionar o modelo figura (5). O modelo, após uma rotação completa, estará envolto em uma camada uniforme da mistura de resina e areia. Nesse processo a temperatura do modelo deve estar por volta de 230 - 270°C, pois a resina irar se fundir

e se solidificar, formando o molde. O modelo e molde são separados, permitindo assim o envase de metal líquido para a formação de novas peças.

Figura 5 - Ilustração das fases da moldagem em casca



Fonte: Adaptado de Novo Telecurso – Processos de Fabricação 1 (2009, p. 32).

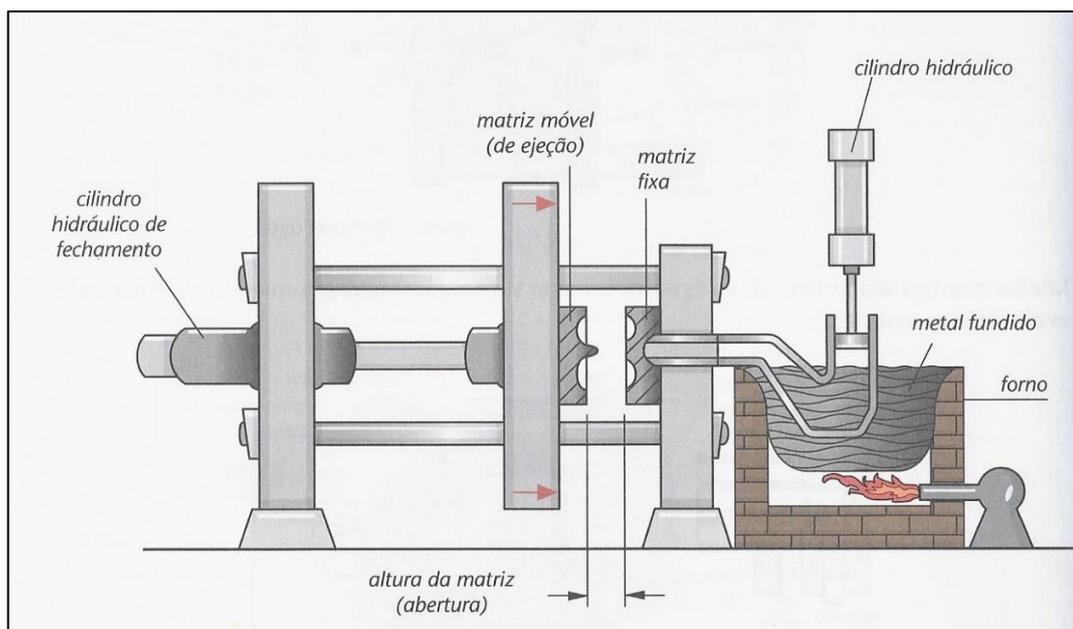
2.9. Moldagem sob pressão

Consiste em forçar o metal líquido, sob pressão, a penetrar na cavidade do molde chamado matriz. Essa é metálica, portando de natureza permanente e, assim, pode ser usada inúmeras vezes (Chiaverini, 1977). Como é demonstrado na figura (6).

Devido à pressão e alta velocidade de preenchimento, o processo possibilita a fabricação de peças de paredes mais finas e complexas comparado ao processo por gravidade.

A matriz do molde consiste de duas peças que são hermeticamente fechadas, o metal é bombeado em quantidade de modo que preencha a cavidade e os canais para evasão de ar. Após o enchimento a pressão no molde é mantida até que a solidificação da peça se complete.

Figura 6 - Equipamento utilizado para a moldagem sob pressão

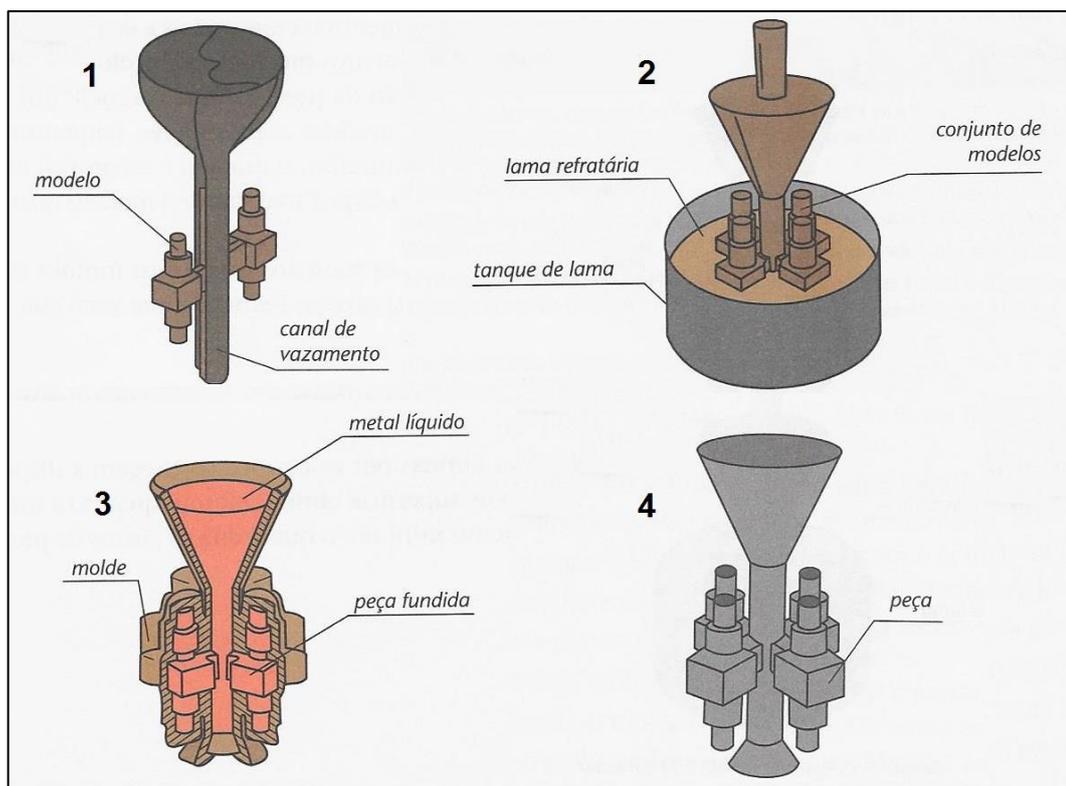


Fonte Adaptado de Novo Telecurso – Processos de Fabricação 1 (2009, p. 44).

2.10. Cera perdida

Torre (2004), diz que o processo de cera perdida, é normalmente utilizado para a obtenção de peças artísticas. O processo se faz necessário, quando em função de uma geometria específica, a retirada do modelo poderá gerar algum dano ao molde. O molde é produzido a partir do revestimento do modelo com lamas cerâmicas de elevada refratariedade, como é ilustrado na figura (7). Devido à baixa permeabilidade desses moldes foi desenvolvido o vazamento CLA (*Counter-gravity Low-pressure Casting*), que consiste na sucção do metal através da diminuição da pressão ao redor do molde. Além de garantir um melhor preenchimento das seções finas, com esse método os canais são reduzidos a uma seção mínima do canal de ataque, já que o restante – ainda não solidificado - retorna à panela.

Figura 7 - Ilustração das fases do processo de cera perdida



Fonte: Adaptado de Novo Telecurso – Processos de Fabricação 1 (2009, p. 36).

2.11. Fornos

Segundo Soares (2000), fornos de fusão é um equipamento utilizado para elevar a temperatura do metal até o ponto de fusão, ou então até a temperatura onde o metal líquido apresente características adequadas para o envase. Sendo divididos em dois tipos:

- Fornos elétricos: a arco direto ou indireto, indução por canal ou a cadinho e de resistência elétrica;
- Fornos por combustível: carvão, óleo combustível, G.L.P e gás natural.

Sendo divididos em fornos de cuba, reverberação ou rotativo; de cadinho, aquecimento externo ou interno. Na escolha de qual forno utilizar, deve se levar em consideração o tipo de liga, a quantidade de material desejada e também a disponibilidade de fonte de energia a custo acessível, entre outros (Baldman e Vieira, 2014).

3. Elementos construtivos do forno

3.1 Cadinho

Tem como finalidade fundir metais e de mantê-los neste estado em função da transmissão de calor por uma fonte externa de energia, sendo esta transferência de calor por duas formas: a condução e irradiação (Morganite, 2010).

Morgan (2013), complementa que o cadinho é composto de um material altamente heterogêneo a base de grafite, e que o alinhamento e controle estrutural desse grafite que determinam se o cadinho alcançará a performance requerida. O cadinho varia de um tamanho de uma xícara até a capacidade de toneladas de metal, podendo ser fixo ou removível do forno.

Morganite (2010), define que algumas características a serem analisadas para a correta definição do cadinho a ser selecionado, como o tipo de metal a ser fundido, temperatura de fusão e a forma de aquecimento a ser utilizado observado na tabela (1).

Tabela 1 - Propriedades dos cadinhos

Propriedades	Grafite-argila	Grafite ligado a Carbono	Carbeto de Silício com Carbono
Transferência de calor	boa	boa	excelente
Refratariedade	muito boa	boa	boa
Resistência a choques térmicos	boa	boa	excelente
Resistência a oxidação	regular	boa	excelente
Resistência ao ataque de fluxo e escória	regular	boa	boa
Resistência à erosão metálica	regular	boa	excelente
Performance média			
Fusão de Ligas de Al	boa	boa	excelente
Manutenção de Al	regular	regular	excelente

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Morganite (2005).

Segundo Morgan (2013), nos fala que os fornos por resistência elétrica normalmente têm um aquecimento mais lento do que os de combustíveis, desta maneira exige cadinhos com uma alta eficiência energética. Que é encontrado em cadinhos com alto teor de carbono, pois conseguem fornecer uma alta condutividade térmica, proporcionando uma fusão mais rápida. Os fornos para cadinho normalmente são de forma circular, para fornecer uma distância uniforme entre o cadinho e as resistências. Morganite (2010), afirma que essa distância do cadinho até a resistência deve variar de 45 a 70 mm, dependendo da potência do forno, e que ele deve ficar centralizado, desta maneira garantindo que a distância será homogênea para com as resistências.

3.2. Resistência elétrica

Boylestad (2004), define resistência elétrica como sendo a oposição ao fluxo de carga através de qualquer material. Oposição essa oriunda do atrito entre elétrons e também dos elétrons com os átomos do material.

O dimensionamento da resistência bem como o material do forno, é construído e deve obedecer a algumas prescrições básicas, tais como:

- Ter uma elevada temperatura de fusão, na ordem de 25% superior à temperatura de fusão do material de trabalho;
- Ser resistente à corrosão na temperatura de operação;
- Ter resistividade elevada;
- Apresentar elevado grau de dureza em altas temperaturas.

As resistências podem ser ligadas em circuitos monofásicos ou em circuitos trifásicos, na configuração estrela ou triângulo.

Segundo Mamede (2010), um dado importante na escolha da seção de um resistor é a carga específica superficial que representa a maior taxa de transferência de potência cedida por unidade de superfície, dado normalmente em W/cm^2 . Na tabela (2), podemos ver a carga específica de alguns materiais, normalmente constituídas de fios e tiras, disposto na forma de espiral.

Tabela 2 - Carga específica superficial (W/cm²)

Tipo de liga	Temperatura do Forno (°C)					
	600	700	800	900	1000	1100
80% Ni- 20%Cr	5	3,2	2,2	2,5	1,1	0,9
30% Ni -20% Cr	4,6	3	2	1,4	1	0,8
20% Cr – 5% Al	8	5,8	4,3	3,1	2,2	1,3
Cr-Al-Co-Fe (KANTHAL)	3,9	3,5	3	2,4	1,5	-

Fonte: Adaptada pelo autor com base em Mamede (2010).

Mamede (2010), nos diz que para dimensionamento de um forno elétrico de aquecimento indireto pode obedecer às seguintes etapas:

a) Potência desejada do forno

A potência do forno é função do material a ser trabalhado e do tempo para o qual se deseja atingir a condição de operação, onde podemos ver na equação a seguir:

$$P_f = \frac{E \times P_m}{\eta \times T} \quad (1)$$

Onde:

P_f = potência do forno (kW);

η = rendimento do forno: entre 0,6 e 0,8;

T = tempo desejado para atingir a temperatura de trabalho (h);

P_m = peso do material a ser trabalho (ton);

E = energia consumida no processo (kWh/t).

A tabela (3) apresenta a energia para elevar a temperatura a um valor desejado dos metais em (kWh/t).

Tabela 3 - Energia para elevar a temperatura a um valor desejado dos metais (kWt/h)

Material	Temperatura desejada (°C)								
	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Aço	20	38	50	60	90	120	160	175	215
Al	55	80	100	140	170	300	335	370	393
Cu	-	-	-	57	65	76	90	100	120
Ag	-	-	27	28	45	50	55	60	105
Ni	20	38	50	60	85	100	115	140	160

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Mamede (2010).

b) Determinação do diâmetro do fio resistor

$$D_f = 34,4 \times \sqrt[3]{\frac{\rho}{P_1} \times \left(\frac{P_N}{N_p \times V}\right)^2} \quad (2)$$

Onde:

D_f = diâmetro do fio resistor (mm);

ρ = resistividade do material ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$);

P_1 = carga específica superficial do resistor (W/cm^2);

V = tensão de suprimento (V);

P_n = potência por fase do forno (kW);

N_p = número de circuitos resistores em paralelo.

c) Determinação do comprimento do fio do resistor

$$L_f = \frac{R_r}{R_{\Omega/m}} \quad (3)$$

Onde

R_r = resistência do fio resistor (Ω);

$R_{\Omega/m}$ = resistência (Ω/m).

3.3. Transferência de calor

Segundo Incopera (2011), transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço. Como a termodinâmica trabalha com estados termodinâmicos em equilíbrio e transformações de um estado de equilíbrio para outro, a transferência de calor trabalha com sistemas que não estão em equilíbrio. Desta forma a transferência de calor não pode ser baseado na apenas no princípio da termodinâmica (Çengel,2012).

O calor pode ser transferido de três diferentes modos: condução, convecção e radiação. Para que ambos ocorram é necessário a existência de diferença de temperatura no sentido do maior para a menor. A seguir comentaremos um pouco sobre cada uma delas.

3.4. Condução

Çengel (2012), nos fala que a condução é a transferência de energia de uma partícula mais energética de uma substância para partículas vizinhas adjacentes menos energéticas, como resultado as interações entre elas. Ocorrendo entre sólidos, líquidos ou gases.

Nos sólidos ocorre por causa da combinação das vibrações das moléculas em rede, sendo a energia transportada por elétrons livres. Já em líquidos e gases, a condução deve-se às colisões e difusões das moléculas em seus movimentos aleatórios.

A transferência por condução pode ser quantificada em termo de equações de taxas apropriadas, calculando a quantidade de energia transferida por unidade de tempo. Para a condução térmica a taxa é conhecida por lei de Fourier.

$$Q = kA \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

Onde:

Q = calor transferido (W);

k = condutividade térmica do material (W/m.K);

A = área da superfície (m²);

dT/dx = gradiente de temperatura (K/m).

3.5. Convecção

Segundo Çengel (2012), a convecção é o modo de transferência de energia entre a superfície sólida e a líquida ou gás adjacente, que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e do movimento de um fluido. Quanto mais rápido for o movimento do fluido, maior será a transferência de calor por convecção.

Temos que a transferência de calor por condução pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido. Convecção forçada quando o escoamento é causado por meios externos, tais como um ventilador. E a convecção natural onde o escoamento é induzida por forças de empuxo, originadas a partir de diferenças de densidades (massa específica) causadas por variações de temperatura no fluido, Incopera (2011).

Sendo de alta complexidade, se observa que a taxa de transferência de calor por convecção é proporcional a diferença de temperatura. Essa proporcionalidade é expressa como lei de Newton do resfriamento, onde é descrita na equação (5).

$$E = h(T_s - T_\infty) \quad (5)$$

Onde:

h = coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m^2K);

T_s = temperatura da superfície (K);

T_∞ = temperatura longe da superfície (K);

E = taxa de transferência de calor (W/m^2).

O coeficiente de transferência de calor por convecção h não é uma propriedade do fluido. Trata-se de um parâmetro determinado experimentalmente, cujo valor depende das variáveis que influenciam a convecção, como geometria da superfície, natureza do movimento do fluido.

3.6. Convecção Natural

Incopera (2011), define que convecção natural é o mecanismo de transferência de calor no qual o movimento do fluido ocorre somente em função das diferenças de massa específica, que por sua vez, decorre da diferença de temperatura, não sendo alterada por nenhuma fonte de movimento externa, como por exemplo, ventiladores.

3.6.1. Número de Nusselt

De acordo com Incopera (2011), o número de Nusselt é um parâmetro igual ao gradiente de temperatura adimensional na superfície e fornece medida de transferência de calor por convecção que ocorre na superfície.

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (6)$$

Onde

h = coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m²K);

k = condutividade térmica do material (W/m.K);

L_c = comprimento característico (m);

Nu = Numero de Nusselt (adimensional);

Então o número de Nusselt representa o aumento da transferência de calor através da camada do fluido como resultado da convecção e relação a condução do mesmo fluido em toda a camada.

3.6.2. Número de Grashof

Çengel (2012), diz que as equações que regem a convecção natural e as condições de contorno podem ser adimensionalizadas pela divisão de todas as variáveis dependentes e independentes por quantidades constantes adequadas.

Assim como o número de Reynolds representa a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas que agem sobre o fluido. Já no regime de escoamento por convecção natural é regido pelo número adimensional de Grashof que representa a razão entre a força de empuxo e a força viscosa que agem sobre o fluido.

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \quad (7)$$

Onde

g = aceleração da gravidade (m/s²);

β = coeficiente de expansão volumétrica (1/K, $\beta=1/T$ para gás ideal);

T_s = temperatura da superfície (K);

T_∞ = temperatura do fluido longe da superfície (K);

L_c = comprimento característico da geometria (m);

ν = viscosidade cinemática do fluido (m²/s);

3.6.3. Convecção sobre superfícies

Em uma superfície a transferência de calor por convecção natural depende da geometria e de sua orientação, temperatura da superfície e das propriedades termo físicas do fluido envolvido.

Sendo de alta complexidade o movimento do fluido torna difícil a obtenção de relações analíticas simples para a transferência de calor por meio das equações de regem o movimento e a energia. Por isso são usadas soluções analíticas para geometrias simples sob suposições simplificadoras.

3.6.4. Número de Rayleigh

O número de Rayleigh é o produto de número de Gashof, que descreve a relação de flutuação e a viscosidade dentro do fluido (Çengel, 2012).

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu\alpha} \quad (8)$$

Onde

Ra = o número de Rayleigh;

Gr = o número de Grashof;

Pr = uma constante (número de Prandtl);

g = gravidade (m/s^2);

β = o coeficiente de dilatação térmica em (K^{-1});

T_s = a Temperatura da superfície (K);

T_∞ = a temperatura do fluido (K);

L = o comprimento característico da geometria (m);

ν = a Viscosidade cinemática (m^2/s);

α = a Difusividade térmica (m^2/s).

Quando temos um cilindro vertical, Çengel (2012), fala que podemos tratar como placa vertical quando o seu diâmetro for suficientemente grande, de modo que os efeitos da curvatura são insignificantes. Ou seja, quando a seguinte condição é satisfeita:

$$D \geq \frac{35L}{Gr_L^{1/4}} \quad (9)$$

Onde

D = diâmetro do cilindro (m);

L = o comprimento característico da geometria (m);

Gr_L = o número de Grashof;

3.11. Radiação

É a energia emitida pela matéria sob a forma de ondas eletromagnéticas (ou fótons) como resultado das mudanças na configuração eletrônicas de átomos (Çengel, 2012).

A energia de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas, ou seja, independe de um meio material para sua transferência, ao contrário da condução e convecção. Sendo a radiação mais eficiente no vácuo. Segundo Çengel (2012), a radiação que é emitida pela superfície tem sua origem na energia térmica da matéria

delimitada pela superfície e a taxa de na qual a energia é liberada, conhecido com poder emissivo.

Temos que a radiação máxima pode ser emitida de uma superfície na temperatura termodinâmica é dada pela lei de Stefan-Boltzmann que é descrita na equação (10).

$$E_n = \sigma T_s^4 \quad (10)$$

Onde:

σ = constante de Stefan-Boltzmann ($W/m^2.K^4$);

T= temperatura da superfície (K);

E = taxa máxima de transferência de calor (W/m^2).

Essa taxa máxima é chamada de corpo negro. Sendo o fluxo térmico emitido por uma superfície real menor do que um emitido por um corpo negro à mesma temperatura e é dado pela equação (11).

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (11)$$

Onde:

ε = emissividade;

σ =constante de Stefan-Boltzmann ($W/m^2.K^4$);

T= temperatura da superfície (K);

E = taxa máxima de transferência de calor (W/m^2).

Com valores na faixa de $0 \leq \varepsilon \leq 1$, essa propriedade fornece uma média de eficiência de energia emitida comparada ao corpo negro, logo, sendo um valor adimensional. Outra propriedade importante é a **absortividade** α , que é a fração de energia de radiação incidente sobre a superfície que absorve. Assim como a emissividade seu valor está entre $0 \leq \alpha \leq 1$. Quando um corpo possui ($\alpha = 1$) chamamos de corpo negro, ou seja, um corpo negro é um emissor perfeito e um absorvedor perfeito.

A diferença entre as taxas de radiação emitida e radiação absorvida é a transferência de calor líquida por radiação. Se a taxa de absorção é maior que a taxa de emissão, a superfície está ganhando calor de radiação. Caso contrário está perdendo energia, Çengel (2012).

Quando uma superfície de emissividade ϵ a uma temperatura T_s é completamente delimitada por uma superfície maior a uma temperatura maior T_{eir} separadas por um gás (como ar) que não intervém na radiação, a taxa líquida de transferência de calor radiante é dada pela diferença das duas superfícies dada pela equação (12):

$$E = \epsilon\alpha(T_s^4 - T_{eir}^4) \quad (12)$$

Onde:

ϵ = emissividade;

α = absorvidade;

σ = constante de Stefan-Boltzmann ($W/m^2.K^4$);

T_s = temperatura da superfície (K);

T_{eir} = temperatura maior (K);

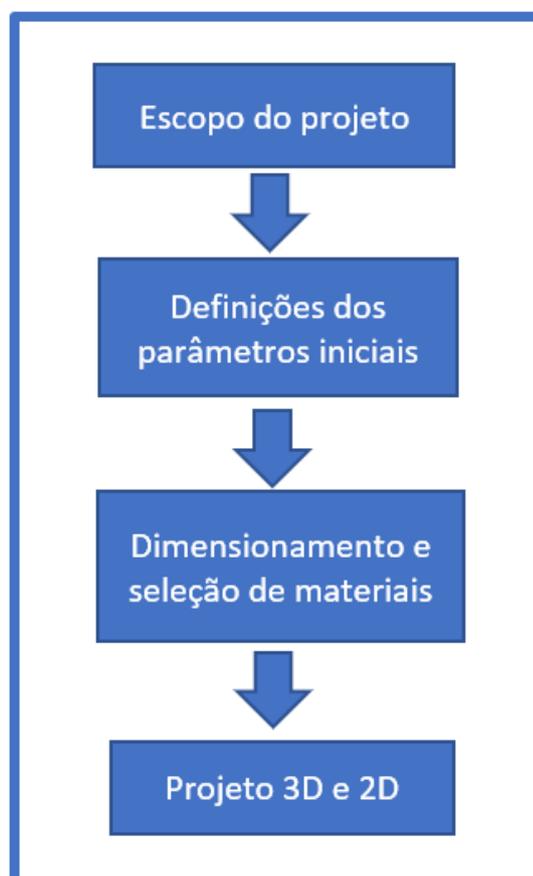
E = taxa máxima de transferência de calor (W/m^2).

4. Materiais e métodos

Neste capítulo iremos descrever como será desenvolvido o projeto desde o dimensionamento da capacidade de fundição, quantidade de calor necessário, do isolamento térmico e o desenho final do projeto.

Para esse projeto foi desenvolvido um fluxograma figura (8) com as etapas a serem seguidas para sua finalização.

Figura 8 - Fluxograma do projeto do forno



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Agora iremos apresentar de maneira detalhada cada etapa abordada no fluxograma:

Escopo do projeto, requisitos do forno:

- Deve ser de pequeno porte - capacidade máxima de até 5 quilos de alumínio;
- Deve apresentar baixo custo de fabricação;
- Deve possuir um dispositivo para o controle de temperatura;

- Deve ser de fácil operação;
- Deve garantir a segurança dos operadores.

Restrições do projeto:

- O forno deve fundir metais não-ferrosos;
- Deve ser possível o manuseio do forno por um operador.

Definições dos parâmetros iniciais: nessa etapa será escolhida a capacidade do forno e a temperatura máxima admitida no exterior.

Dimensionamento e seleções de materiais: neste ponto será calculado a potência do forno, os cálculos da resistência elétrica, os cálculos do isolamento térmicos e escolhas dos materiais.

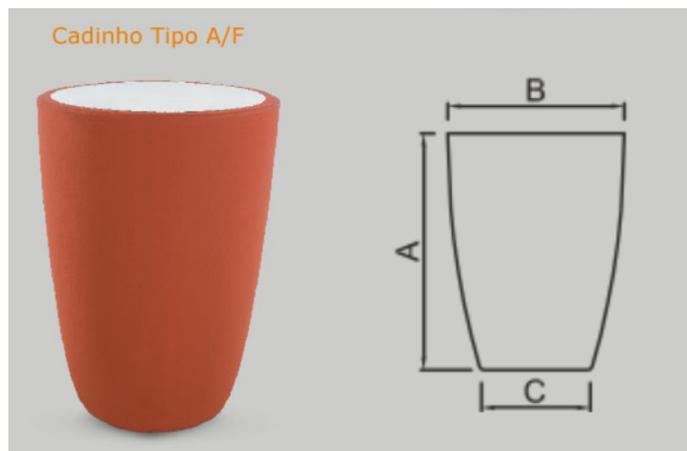
Projetos 3D e 2D: de posse das características de cada material, cadinho, resistência e do isolamento, será realizada o projeto 3D, com auxílio de um software de cada, e posteriormente o 2D para auxiliar na fabricação.

4.1. Desenvolvimento

4.1.1. Definição dos parâmetros

Como previamente citado, esse forno não se trata de fundição de grandes quantidades de alumínio e sim para a fabricação de pequenas peças. Foi definida a capacidade de fundição de 4 a 5 Kg de alumínio. Com a capacidade do forno definida podemos escolher o melhor produto disponível no mercado que atenda nossas especificações. Escolhemos a fabricante de cadinhos Corona, do catálogo, figura (9), foi escolhido o cadinho A/F tamanho 10 possuindo um volume de 2 litros com a capacidade de fundir até 5 Kg de alumínio.

Figura 9 - Cadinho Corona A/F



Fonte: Catálogo Corona¹

Os cadinhos da linha A/F São cadinhos em Carbetto de Silício, indicados para o trabalho com alumínio e suas ligas. Além de ser indicada para a utilização de alumínio, esta linha de cadinhos também é indicada para a utilização em fornos elétricos.

4.1.2. Dimensionamento da potência do forno e resistência elétrica

Para dimensionamento da potência e resistência do forno é necessário saber a capacidade máxima do cadinho e o tempo para fundição.

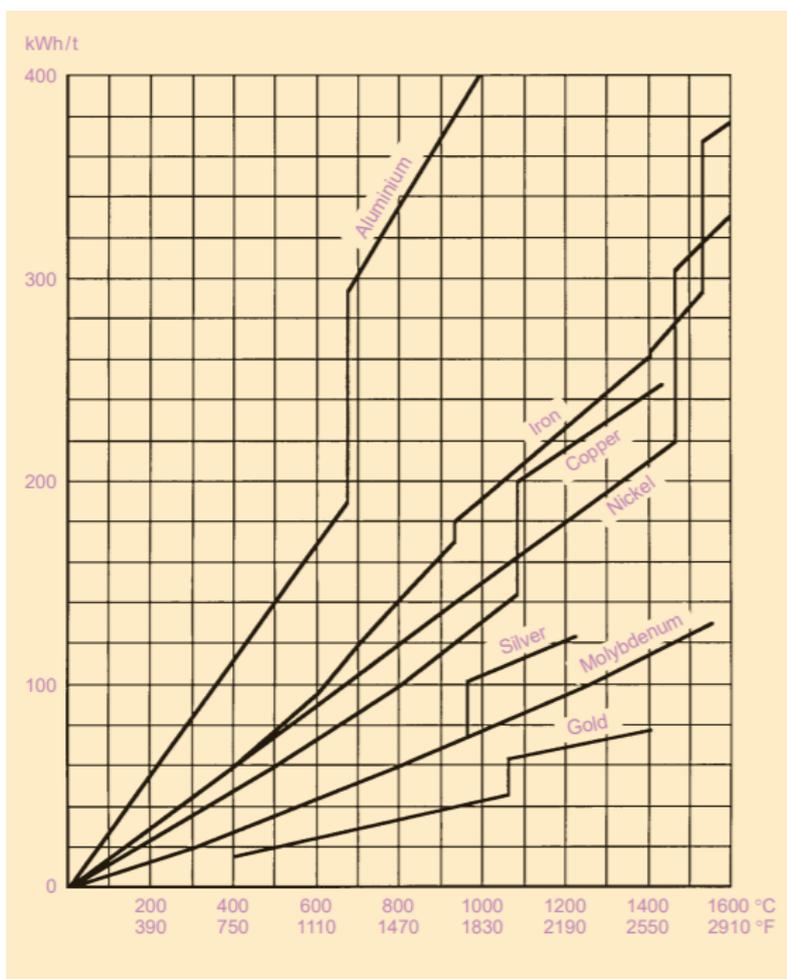
Do tópico anterior temos que o cadinho tem capacidade máxima de 5 kg de alumínio o tempo escolhido para a fundição foi de 30 minutos, considerado um tempo conveniente para o processo. Sabendo que o ponto de fusão do alumínio puro é de aproximadamente 660 °C, e que impurezas contidas no material podem aumentar este valor, será considerada uma temperatura de fusão de 700 °C.

Vamos utilizar o método proposto por Mamede (2010), equação (13) para o cálculo da potência, a quantidade de energia consumida na fundição do alumínio podemos tirar da figura (10), o rendimento de um forno varia entre 0,6 e 0,9, de posse de todos os dados temos que a potência do forno é:

¹ Disponível em: < <http://www.coronacadinhos.com.br/cadinhos-carbeto-silicio.html>> acessado em janeiro de 2019

$$P_f = \frac{300 \times 0,005}{0,6 \times 0,5} = 5 \text{ kW} \quad (13)$$

Figura 10 - Média teórica de armazenamento de calor por tonelada e kWh para alguns metais comuns



Fonte: Kantal,2018

O forno será ligado a uma tensão de 220 V, utilizando a lei de Ohm temos que a resistência elétrica é dada por:

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (14)$$

$$R = \frac{220^2}{5 * 10^3} = 9,86 \Omega$$

Onde:

R = resistência (Ω);

P = potência (W);

V = tensão (V).

Tem-se que esta é a resistência do material para a temperatura de trabalho. Sabemos que a resistência varia de acordo com a temperatura. De acordo com catálogo de KANTHAL (2018), é necessário utilizar um fator de conversão C_t . Foi escolhido o modelo de fio KANTHAL A1-1. A tabela (4) mostra o fator de correção para as faixas de temperaturas de trabalho.

Tabela 4 - Fatores de conversão em função da temperatura para KANTHAL A-1 e APM

°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
C_T	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04	1,04	1,05

Fonte: Adaptado pelo autor, KANTHAL, 2018

Dos dados retirados da tabela (4) podemos calcular a resistência em temperatura ambiente aplicando a equação (15)

$$R_{20^{\circ}C} = \frac{R(T)}{C_t(T)} \quad (15)$$

$$R_{20^{\circ}C} = \frac{9,86}{1,02} = 9,66 \Omega$$

KANTHAL (2018), recomenda que para fios enrolados em forma de bobina e apoiado em cavidades de suporte refratário, o diâmetro mínimo deve ser 3 mm.

Tabela 5 - Tabela de características dos fios Kanthal A-1 e APM

wire standard itens (at 20 °C)			
Diâmetro (mm)	Resistência (Ω/m)	Resistividade (cm ² /Ω)	Peso (g/m)
10,0	0,0185	17017	558
9,5	0,0205	14590	503
8,3	0,0271	9555	380
8,0	0,0288	8712	375
7,4	0,0340	9790	300
7,0	0,0377	5837	273
6,5	0,0437	4637	236
6,0	0,0513	3679	201
5,5	0,0610	2831	169
5,0	0,0738	2127	139
4,8	0,0818	1824	126
4,5	0,0912	1550	113
4,25	0,1020	1306	101
4,00	0,1150	1090	89,2
3,75	0,1310	897	78,4
3,5	0,1510	730	68,3
3,25	0,1750	584	58,9
3,0	0,2050	460	50,2
2,9	0,2200	416	46,9
2,8	0,2350	374	43,7
2,6	0,2730	299	37,7
2,5	0,2950	266	34,7
2,4	0,3210	235	32,1
2,3	0,3490	207	29,5
2,2	0,3810	181	27,0
2,0	0,4620	136	22,3
1,8	0,5700	99,2	18,1
1,7	0,6390	83,6	16,1

Fonte: Adaptado pelo autor de KANTHAL, 2018

Para validar se o diâmetro de 3mm do fio satisfaz nossas condições de trabalho, para isso é necessário o cálculo da carga de superfície do mesmo, medida em W/cm², da tabela (5) podemos retirar os dados de resistividade. Segundo KANTHAL (2012), a carga de superfície pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\frac{A_c}{R_{20^{\circ}\text{C}}} = \frac{I^2 \times C_t}{p} \quad (16)$$

Para encontrarmos a corrente elétrica (I) que passa pelo fio na sua temperatura de trabalho, utilizaremos a lei de Ohm.

$$I = \frac{V}{R} \quad (17)$$

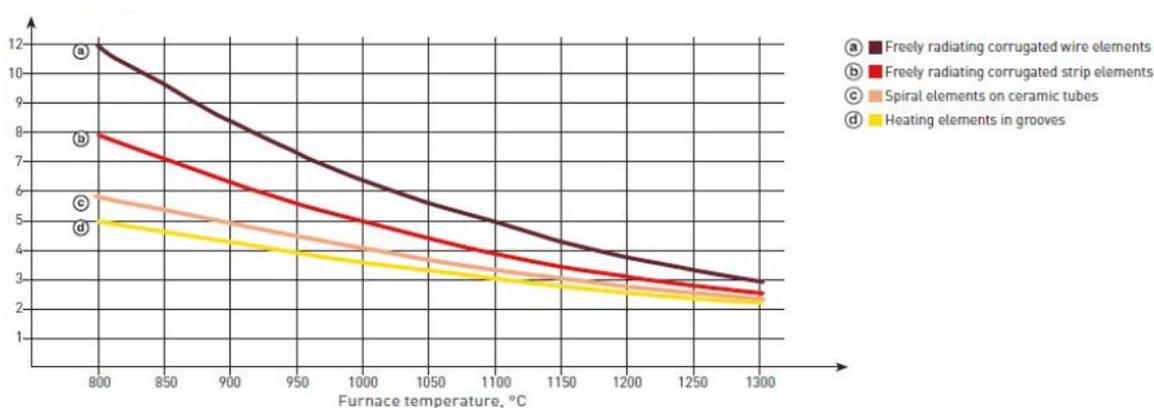
$$I = \frac{220}{9,68} = 22,7 \text{ A}$$

Com o valor da corrente conhecido podemos agora calcular a carga superficial do fio utilizando a equação (17).

$$p = \frac{I^2 \times C_t}{\frac{A_c}{R_{20^\circ\text{C}}}} = \frac{22,7^2 \times 1,02}{460} = 1,14 \text{ W/cm}^2$$

KANTHAL (2018) estabelece o limite para a carga de superfície para determinadas aplicações. Comparando o resultado encontrado com a figura (11), vemos que a carga de superfície está dentro do limite estabelecido pelo fabricante.

Figura 11 - Carga de superfície máxima recomendada



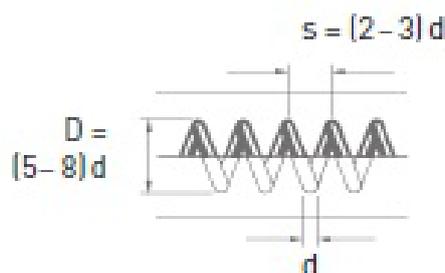
Fonte: KANTHAL, 2018

Sendo possível utilizar o fio KANTHAL A-1 de 3 mm de diâmetro e sabendo que sua resistência por metro é de $0,205 \Omega/\text{m}$, encontra-se que o comprimento necessário será de, como apresentado na equação (18).

$$L = \frac{R_{20^\circ\text{C}}}{0,205} = \frac{9,66}{0,205} \cong 38 \text{ m} \quad (18)$$

Como já selecionamos o diâmetro do fio e seu comprimento, iremos agora dimensionar o seu enrolamento em forma de espiral. Para isso utiliza-se as recomendações de KANTHAL (2018) figura (12) para o diâmetro (D) da espira e passo (s), encontrados na figura a seguir.

Figura 12 - Limites para passo e diâmetro das espiras



Fonte: KANTHAL, 2018

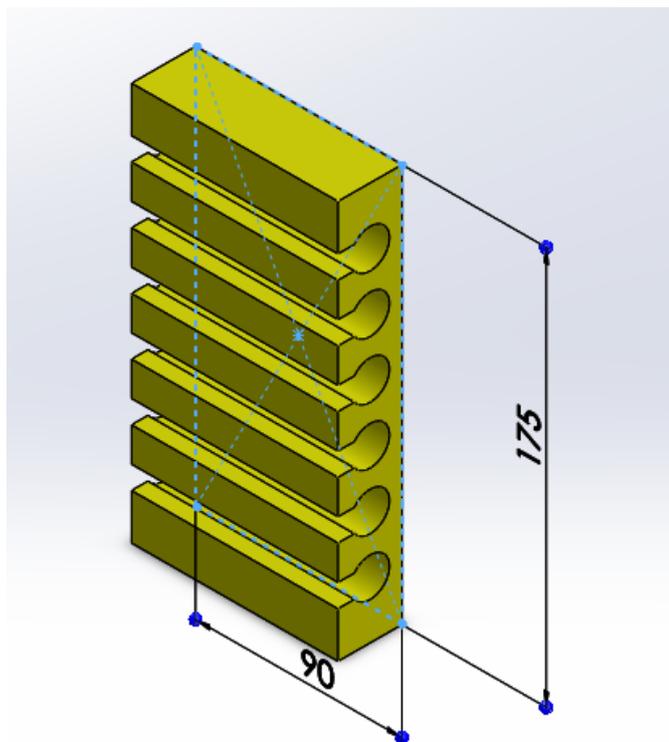
Escolheu-se o menor diâmetro de espira possível, que equivale a cinco vezes o diâmetro do fio, resultando em $D=15\text{mm}$ e 806 espiras segundo a equação (19). Mas antes do cálculo do passo será necessário saber o espaço disponível para o enrolamento da resistência.

$$n^{\circ} \text{ de espiras} = \frac{L}{\pi \times D} \quad (19)$$

$$n^{\circ} \text{ de espiras} = \frac{38000}{\pi \times 15} \cong 806$$

Os suportes refratários são escolhidos através de modelos pré-estabelecidos encontrados nos catálogos de vários fabricantes. Esses suportes possuem o mesmo formato para os modelos diferenciando apenas as dimensões. O modelo escolhido foi o SR15, pois possui canais maiores que 15 mm de diâmetro. As dimensões do suporte podem ser vistas na figura (13).

Figura 13 - Suporte refratário da resistência



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Sendo os suportes de formato plano, foi decidido formar um polígono em volta do cadinho assim distribuindo melhor o calor emitido pelas resistências. Foi escolhido uma configuração de decágono com lados de 100 mm. Onde dividimos os 5 suportes de 200 mm pela metade. Com os suportes refratários definidos, pode-se calcular o passo da bobina. Para isso, faz-se necessário somar o comprimento de todos os canais disponíveis nos suportes, isto é, 60 canais com 100 mm de comprimento, totalizando 6 metros de comprimento.

Como foi visto na figura (12) o passo ideal para o enrolamento deve seguir as recomendações. Para confirmar se a nossa disposição atende as especificações dividiremos o comprimento disponível pelo número de espiras equação (20).

$$s = \frac{6000}{806} = 7,4 \text{ mm} \quad (20)$$

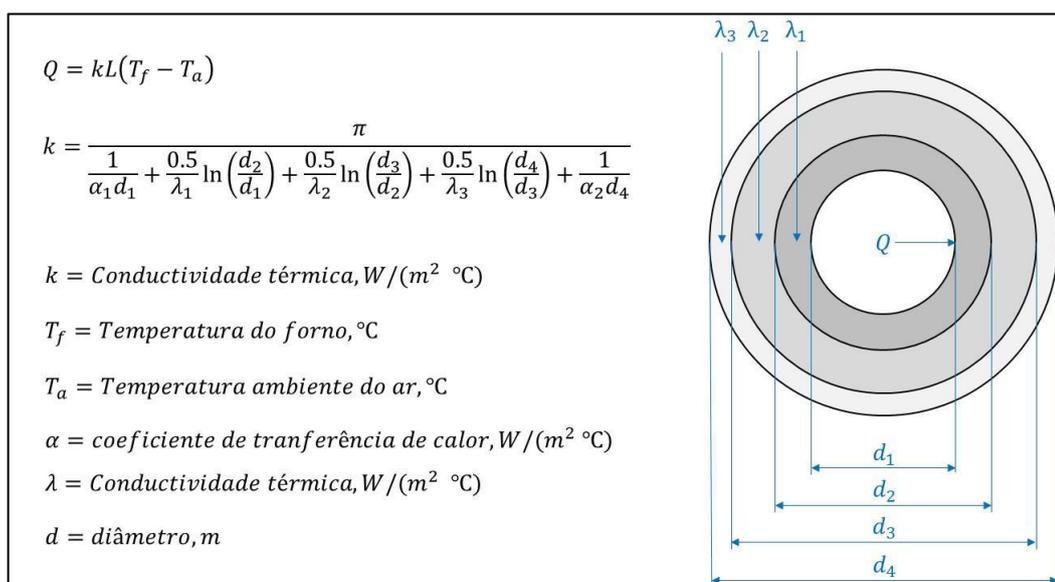
Esse valor está dentro do limite estabelecido pelo fabricante de $6 \leq s \leq 9$ mm. Com isso, obtém-se uma resistência KANTHAL A1 de bitola 3 milímetros com 6 metros de comprimento total, diâmetro da espira de 15 milímetros e um passo de 7,4 milímetros.

4.1.3. Sistema de Isolamento térmico

O sistema de isolamento tem dois principais motivos: reduzir a perda de calor para o ambiente interno e controlar a temperatura da parede externa do forno. Ou seja, o primeiro motivo torna o forno mais eficiente reduzindo a perda de calor do interior para o exterior via condução e o segundo motivo garante a segurança, seja por contato intencional como por contato acidental, evitando acidentes e queimaduras.

Para o dimensionamento utilizamos equações de transferência de calor adaptadas para o caso de fornos de fundição cilíndricos com três camadas, essas equações estão presentes no catálogo do fabricante KANTHAL, conforme as figuras (14) e (15).

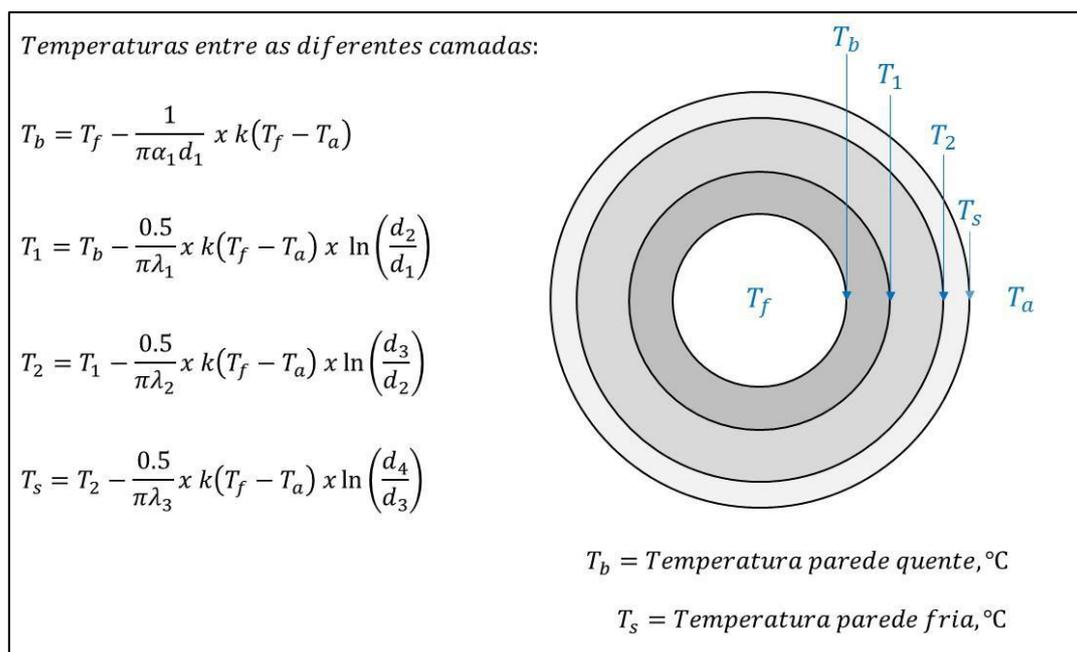
Figura 14 - Equações para cálculo do isolamento térmico com três camadas



Fonte: KANTHAL, 1999

Como o projeto se enquadra na configuração de três camadas, não foi necessário a modificação das equações. A primeira camada são os suportes refratários, a segunda é o material escolhido para o isolamento térmico, nesse projeto será utilizada uma manta cerâmica e a terceira camada a carcaça metálica.

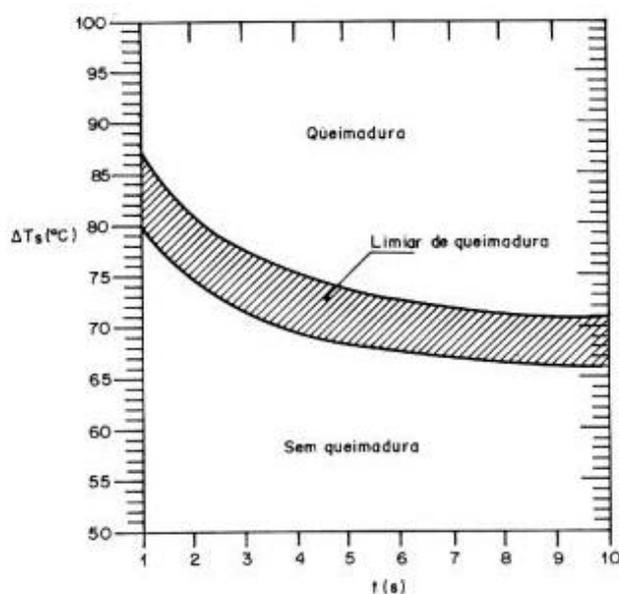
Figura 15 - Equações das temperaturas entre as diferentes camadas de isolamento



Fonte: KANTHAL, 1999

Antes de calcularmos a espessura do isolamento térmico será necessária a condição de temperatura da parede fria T_s , ou seja, a temperatura da carcaça do forno. Esta será definida a partir da norma ABNT NBR13970, onde é definido valores limites em superfícies aquecidas para não ocorrem acidentes de queimadura.

Figura 16 - Faixa do limiar de queimadura para contato da pele com superfícies lisas aquecidas de metal sem revestimento

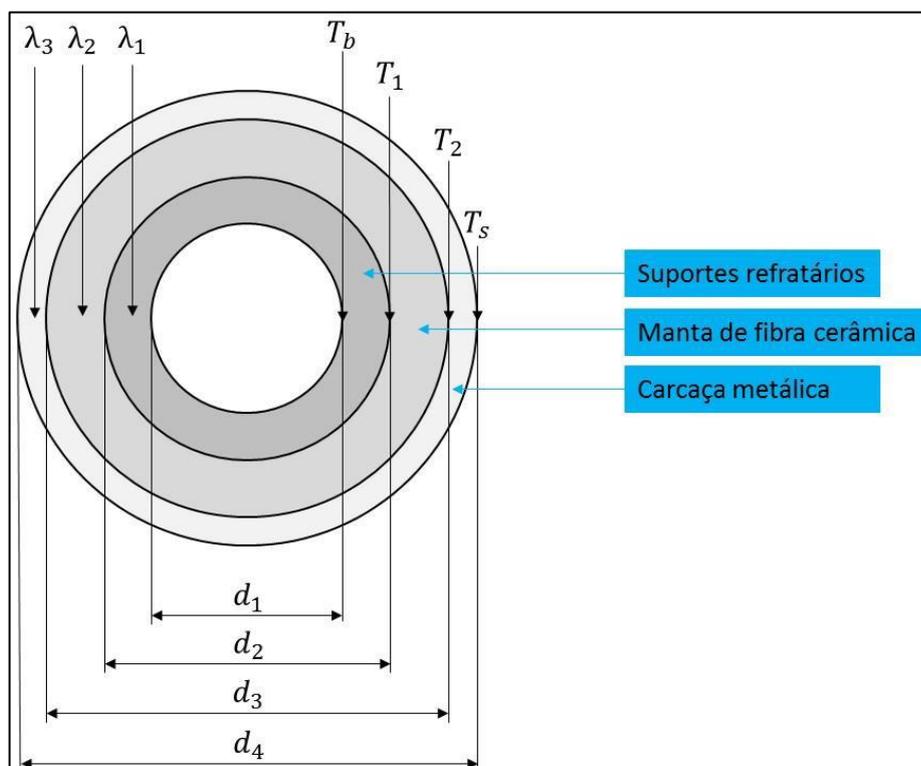


Fonte: NBR 13970,1997

Da figura (16), foi escolhido a temperatura de 70°C, pois em um contato acidental com o equipamento não acontecerá nenhuma queimadura e em caso de um contado maior que 4 segundos ainda não teremos uma queimadura.

Seguindo das recomendações de KANTHAL (1999), temos os seguintes valores para os coeficientes de transferência de calor $\alpha_1=100W/(m^2\text{°C})$ e $\alpha_2 = 10W/(m^2\text{°C})$. Os dados restantes, condutividade térmica e espessura das camadas, serão retirados via tabela do fabricante. Para os diâmetros do forno figura (17) temos a seguinte disposição, d_1 é o diâmetro interno do suporte refratário, sendo ela a primeira superfície que recebe o calor oriundo das resistências, d_2 o diâmetro entre o encontro do suporte refratário e a manta de fibra cerâmica, d_3 o encontro da manta cerâmica com a carcaça metálica do forno e d_4 o diâmetro externo do forno. Para simplificação dos cálculos os suportes refratários dispostos como um pentágono foi considerado como uma circunferência, pois a diferença de temperatura não é significativa para os cálculos.

Figura 17 - Disposição das camadas de isolamento



Fonte: KANTHAL, 1999

Com base no nas recomendações descrita com capítulo sobre cadinhos, a diâmetro dos suportes refratários terá uma distância de 45 milímetros do cadinho com isso o d1 será de 252 milímetros, o diâmetro d2 será o diâmetro d1 mais a espessura do suporte resultando em 308 milímetros. E sabendo-se que a carcaça será feita com uma chapa de aço 1020 de espessura 2 milímetros e que a manta de fibra cerâmica escolhida é a Durablanker S1200 B12 da marca Unifrax com densidade de 192 kg/m³, definiu-se a condutividade térmica como 0,082 W/(m² °C) na temperatura de 700°C, através da figura (18) retirada do catálogo do fabricante.

Figura 18 - Propriedades Físico/Químicas típicas

		Durablanker S 1200					Durablanker S 1400		
		B4	B6	B8	B10	B12	B8	B10	B12
Densidade Nominal	kg/m ³	64	96	128	160	192	128	160	192
Classe Temperatura (*)	°C	1260 / 1315					1427		
Composição Química Básica		SiO ₂ (53%)					SiO ₂ (54%)		
		Al ₂ O ₃ (47%)					Al ₂ O ₃ (30%)		
		-					ZrO ₂ (16%)		
		Fe ₂ O ₃ + TiO ₂ (<0,20%)					Fe ₂ O ₃ + TiO ₂ (<0,20%)		
		Alcalis (<0,25%)					Alcalis (<0,25%)		
Condutividade Térmica (Temperatura Média)	600 °C	0,089	0,086	0,082	0,080	0,077	0,082	0,080	0,077
	800 °C	0,125	0,122	0,107	0,099	0,087	0,107	0,099	0,087
	1000 °C	0,179	0,166	0,141	0,132	0,123	0,141	0,132	0,123
Resistência à Tração (mínimo)	lb/pol ²	3	5	7	9	11	7	9	11
	kPa	20	35	48	62	76	48	62	76
Retração Linear Perm. (24h@250°C)	%	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Calor Específico à 1.100 °C	J/kg °K	1.130							
Ponto de Fusão	°C	1760							
Densidade Específica	g/cm ³	2,73							
Cor Padrão	N/A	Branca							
Condutividade Térmica	Conversão	BTU.in/hr.ft ² .°F x 0,1442 = W/m.°C							
		BTU.in/hr.ft ² .°F x 1,24 = g cal / hr.cm.°C							
		BTU.in/hr.ft ² .°F x 0,124 = k cal / hr.m.°C							
		BTU.in/hr.ft ² .°F x 1,73 = W/m.°C							

Fonte: catálogo Unifrax²

Assim, calculou-se a diâmetro d3 e a temperatura da superfície do forno através das equações presentes nas figuras (14) e (15) com auxílio do Microsoft Excel, utilizando a ferramenta solver, na tabela (4) temos os resultados.

² Disponível em: < <https://www.unifrax.com/wp-content/uploads/2018/08/C-1421.pdf> > acessado em janeiro 2019

Tabela 6 - Cálculo do diâmetro externo do forno

Variável	Valor	Unidade	Variável	Valor	Unidade
$\alpha 1$	100	W/(m ² °C)	Tf	700	°C
$\alpha 2$	10	W/(m ² °C)	Ta	25	°C
$\lambda 1$	2,3	W/(m ² °C)	Tb	691	°C
$\lambda 2$	0,082	W/(m ² °C)	T1	679	°C
$\lambda 3$	52,9	W/(m ² °C)	T2	70,2	°C
d1	0,276	m	Ts	70	°C
d2	0,344	m			
d3	0,514	m			
d4	0,5536	m			
k	1,1595	W/(m °C)			

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Desta forma, para uma temperatura de 70°C a espessura de isolamento da manta de fibra cerâmica é de 83,5 milímetros. Que por questões de construção usaremos uma espessura de 85 milímetros. Para o isolamento térmico da tampa será utilizado também a fibra cerâmica. Já para o fundo do forno, serão utilizados tijolos isolantes e refratários a fim de suportar o peso da carga.

4.1.4. Sistema de basculamento

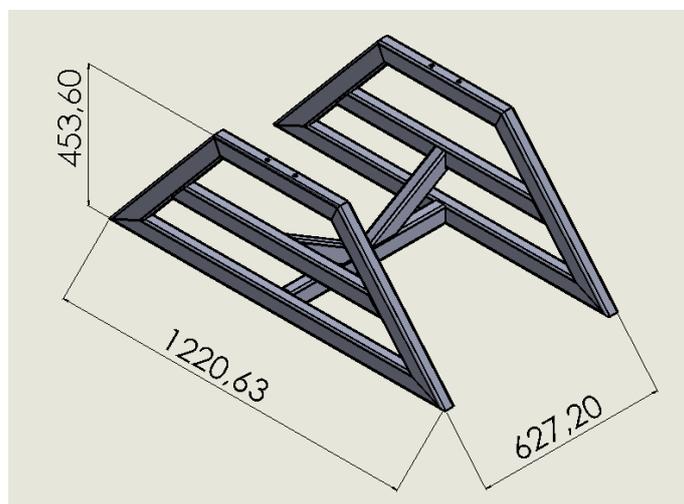
Para manuseio do metal fundido será utilizado um sistema de basculamento, que consiste de um braço mecânico, responsável pela rotação, que é sustentado por uma estrutura metálica e possui um caixa de rolamento para auxílio da rotação. O peso do forno com o material será estimado em 150 quilos. Para os cálculos de dimensionamento será utilizado um peso de 200 quilos.

Para dimensionamento do rolamento foi utilizado o catálogo do fabricante, o movimento foi considerado como estático, pois o forno possui movimentos lentos de oscilação. Com base nas considerações foi escolhido o rolamento SY 30 WDW, os cálculos encontram-se no Apêndice A.

A estrutura metálica para suportar o forno foi projetada com tubos de perfil retangular (60x40x3,2) conhecido como *metalon*. O formato da base e dimensões foram projetadas para a facilitar a construção e que não haja deformação nem tombamento da estrutura durante o basculamento figura (19). Por meio de software

foi feito uma análise das tensões e deformações para garantir a integridade estrutural que pode ser vista no Apêndice B.

Figura 19 - Base do forno em milímetros



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Para o sistema de basculamento, foi escolhido um sistema de braço de alavanca com cinco ângulos para travamento do sistema, por meio de um sistema de mola.

Para a melhor rotação do forno no momento de vazamento do metal líquido o melhor ponto de pivotamento será o centro de massa do forno. Sabendo disso os eixos responsáveis por seu movimento de rotação foram colocados no centro de massa previsto para que a força seja reduzida. Entretanto, é de grande importância salientar que o centro de massa deverá sofrer alterações em função de fatores que não são possíveis de prever como variação da densidade do material e erros de fabricação. A partir dessas considerações, foi considerado um círculo com diâmetro de vinte centímetros em torno do centro de massa.

Com a margem de erro definida, foi possível calcular o torque máximo no basculamento para uma situação limite, ou seja, quando o centro de pivotamento está deslocado dez centímetros do centro de massa, resultando em um toque de 200 Nm.

$$T = P * d \quad (21)$$

$$T = 2000 * 0,1 = 200 \text{ Nm}$$

Com base nos dados, tornou-se possível dimensionar o tamanho do braço da alavanca, feito por um pequeno estudo ergonômico. Segundo a IEA – Associação Internacional de Ergonomia - a ergonomia é uma disciplina científica relacionada ao entendimento das interações entre os seres humanos e outros elementos ou sistemas, e à aplicação de teorias, de princípios, de dados e de métodos à projetos a fim de otimizar o bem-estar humano e o desempenho global do sistema.

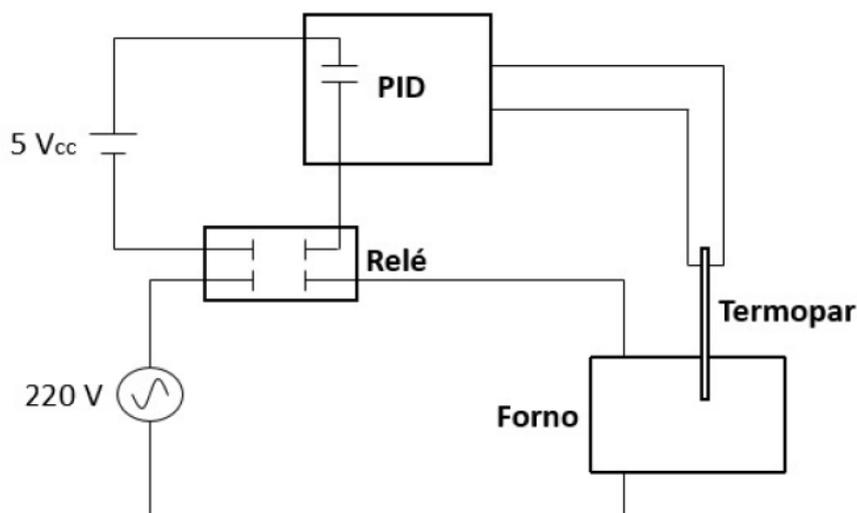
Como a ergonomia trabalha com um percentil para a caracterização de um grupo populacional, para que a força dos usuários do forno englobe a maior parte da população foi estabelecido um percentil de 5% para mulheres e 95% para os homens.

Segundo o banco de dados antropométrico a força média de tração de uma mulher que se enquadra nos 5% é em torno de 406 N. Assim, podemos calcular o braço de alavanca para a rotação do forno. Uma vez que o nosso torque máximo é de 200Nm e temos uma força de 406 N o braço de alavanca terá no mínimo um comprimento de 49,26 centímetros. Para facilitar ainda mais o manuseio do forno o comprimento do braço terá 60 centímetros o que nos dá uma força de 333,3 N. O material do braço será um tubo retangular de seção quadrada de aço SAE 1020.

4.1.5. Sistema de painel Elétrico

Para controle da temperatura do forno será utilizado um sistema composto por um termopar, um relé de estado sólido e um controlador de temperatura PID. Este sistema será responsável por ligar e desligar o forno controlando-o, ou seja, um sistema on/off. O painel elétrico segue o seguinte diagrama esquemático apresentado na figura (20).

Figura 20 - Diagrama esquemático do controlador PID



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O sistema funciona da seguinte forma: o termopar mede a temperatura do forno por uma tensão de saída proporcional à temperatura. O sinal é adquirido pelo controlador de temperatura e comparado com o valor de referência. A função do PID do controlador é, então, obter um valor para variar a saída do controlador. Esse valor é processado pelo controlador, gerando um sinal do tipo *on/off* que ativa o circuito de controle do relé de estado sólido, que alimenta o forno com uma tensão de 220V, (BASILIO et al., 2008).

O termopar escolhido é o tipo K por ser de baixo custo e com variação de temperaturas de -200°C a 1200°C . O controlador PID será o modelo N480D, que alimentará o relé de estado sólido com uma tensão de 5V.

O relé de estado sólido que será responsável por abrir e fechar o sistema de fornecimento de tensão para as resistências será o modelo SSR 4840, que suporta uma corrente de até 40A, que está bem acima da corrente do forno.

4.1.6 Produto final

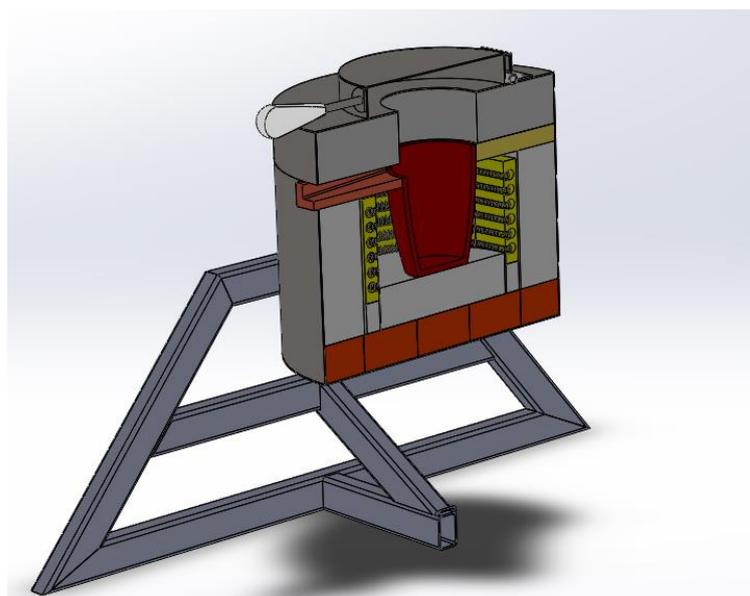
Após todos os cálculos e considerações, o produto final possuirá o desing apresentado nas figuras (21) e (22).

Figura 21 - Projeto final do forno



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 22 - Vista em corte da montagem do forno



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

5. Considerações finais

Este trabalho teve como objetivo traçar os pontos que devem ser considerados para um projeto de um forno para ligas não ferrosas (alumínio e cobre), desde a fase conceitual até o dimensionamento dos principais elementos construtivos. Da análise dos elementos foi possível ter um entendimento prático das melhores configurações e os elementos construtivos que compõem um forno a resistência.

Com o auxílio tanto da literatura acadêmica quanto a oferecida pelo fabricante foi possível o dimensionamento dos elementos construtivos, através dos cálculos foi possível definir as dimensões para os principais elementos, tais como, diâmetros, resistência e isolante térmico.

O resultado, obtido pela consideração inicial que era de um forno com capacidade de 5 quilos de alumínio, alcançou um excelente resultado. Forno este que necessita de uma potência elétrica de 5000 W e um isolante térmico de 85 milímetros para a redução de perdas de calor para o ambiente e garantir uma operação segura aos usuários.

Como consideração final este projeto possibilitou ao autor uma grande fonte de conhecimento, onde foi possível atuar em todas as fases de um projeto conceitual aplicando os conhecimentos de engenharia adquiridos durante o curso.

6. Bibliografia

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – ABAL. **Fundamentos e aplicações do alumínio**. São Paulo. 2007.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2004. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/gerrosil/dispositivos-eletronicos-e-teoria-de-circuitos-8-ed-robert-l-boylestad-louis-nashelsky>>. Acesso em: janeiro 2019.

CORONA CADINHOS. **Catálogo Linhas Carbetto de Silício, Grafite e Grafite Argila**. Diadema, SP. 2015.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 6ª edição, editora LTC, Rio de Janeiro, 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA, ERGOKIT. Rio de Janeiro, 1995. BALDMAN, Roquemar de Lima; VIEIRA, Estéfano Aparecido. **Fundição: processos e tecnologias correlatas**. São Paulo: Saraiva, 2014.

KANTHAL. **Electric Heating Element Handbook**. Hallstahammar. 1999.

KANTHAL HANDBOOK. **Resistance heating alloys and systems for industrial furnaces**. 2001. Disponível em: <<http://www.KANTHAL.com/>>. Acesso em: janeiro de 2019.

KANTHAL. **Heating Alloys for Electric Household Appliances**. Hallstahammar. 2003.

KANTHAL. **Resistance Heating Alloys and Systems for Industrial Furnaces**. Hallstahammar. 2001.

MAMEDE FILHO, João. Instalações Elétricas Industriais. 8ª Edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2010.

MORGAN ADVANCED MATERIALS. **Matching your crucible to your application**.2013. Disponível em: <<http://www.morganmms.com/content/matching-your-crucible-your-application>>. Acesso em: janeiro de 2019.

MORGANITE DO BRASIL LTDA. **Manual de fundição a cadinho**. São Bernardo do campo, 2010. Disponível em:<<http://www.morganitebrasil.com.br/empresa.htm>>. Acesso em: janeiro de 2019.

NBR 13970 - Segurança de máquinas Temperatura de superfícies acessíveis – Dados ergonômicos para estabelecer os valores limites de temperatura de superfícies aquecidas.

PROFISSIONALIZANTE DE MECÂNICA. **Processos de fabricação**. v. 1, Novo Telecurso – Rio de Janeiro – 2009.

UNIFRAX. **Catálogo Manta Durablanket S**. Vinhedo. 2008. GROOVER, M. P., Introdução aos Processos de Fabricação. 1 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016.

Apêndice A

Dimensionamento dos rolamentos

$$P_0 = 0,6 F_r + 0,5 F_a$$

where

P_0 = equivalent static bearing load, kN

F_r = actual radial bearing load, kN

F_a = actual axial bearing load, kN

If $P_0 < F_r$, calculate with $P_0 = F_r$

$$C_0 = s_0 P_0$$

where

C_0 = basic static load rating, kN

P_0 = equivalent static bearing load, kN

s_0 = static safety factor

Table 4

Guideline values for static safety factor s_0

Type of operation	Required static safety factor s_0
Normal loads and smooth, vibration-free operation, where noise levels are not specified, and speeds are very low	$\geq 0,5$
Normal loads and smooth, vibration-free operation, where noise levels are normal	≥ 1
Normal loads and high degree of running accuracy, where low noise levels are specified	≥ 2
Pronounced shock loads, very slow or non-rotating bearings	≥ 2

A partir das fórmulas do catálogo de rolamentos skf, da figura acima podemos calcular a carga estática equivalente P_0 e a carga estática requerida C_0 . Adotou-se o fator de segurança $s_0 = 2$, pois foi considerado como rolamento não rotativo.

Como não existe carga Axial $P_0 = F_r$

$$P_0 = 2 \text{ kN}$$

$$C_0 = 2F_r = 4\text{kN}$$

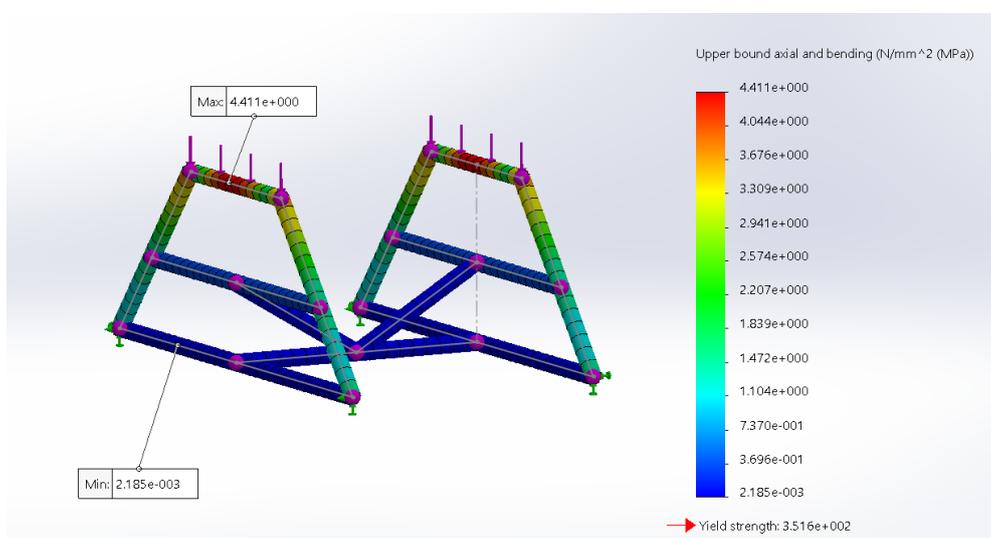
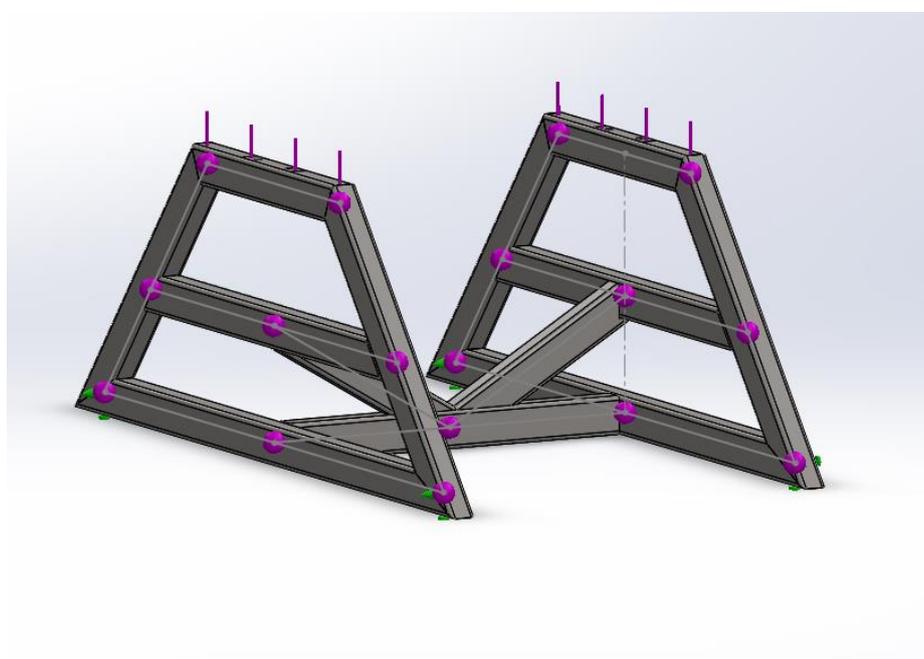
A partir dos cálculos, foi escolhido de rolamento SY 30 WDW da marca SKF com diâmetro nominal do furo de 30 milímetros e com carga estática básica de $C_0 = 11,2 \text{ kN}$.

Apêndice B

Simulação de carga na base do forno

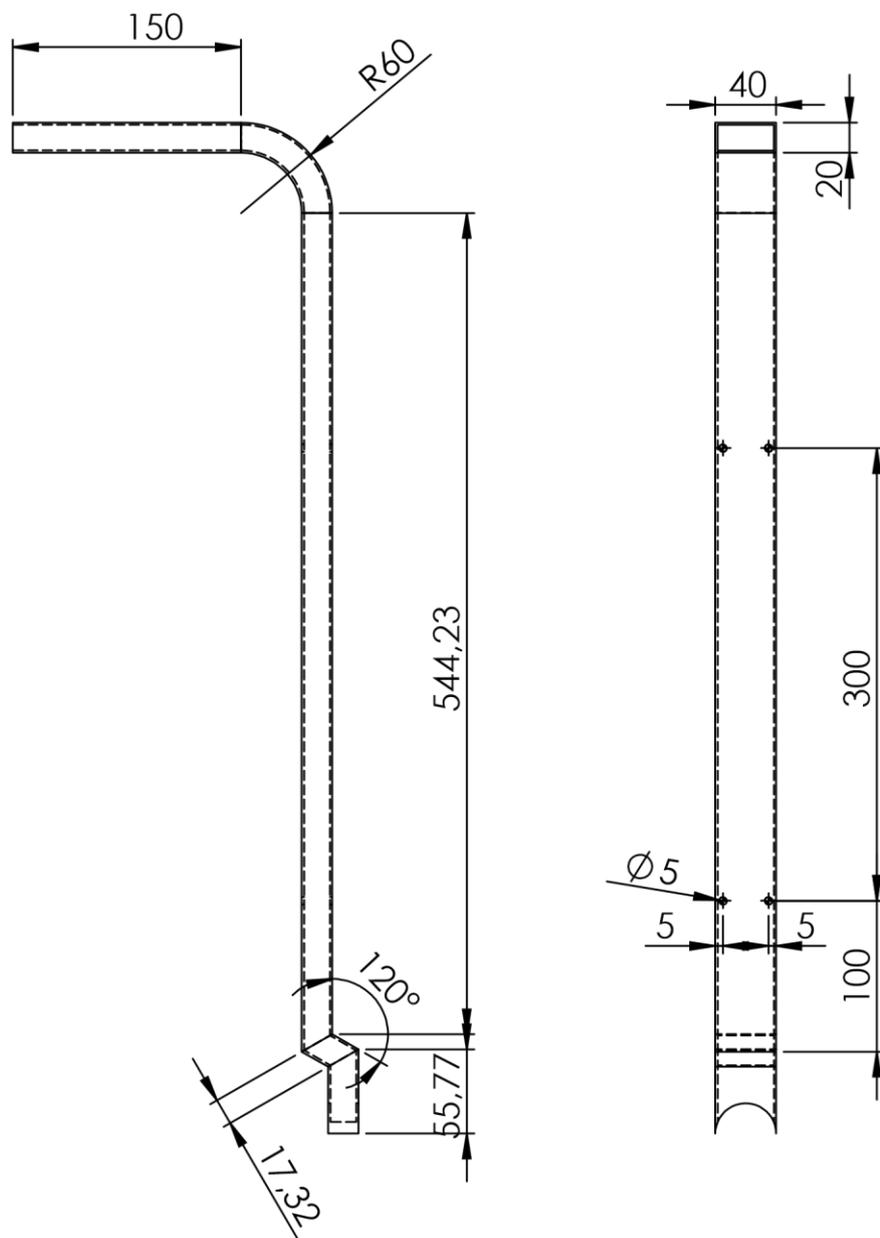
Para garantir, que a base do forno não se deforme e nem se rompa durante a utilização foi realizado via SolidWorks uma simulação estática da base.

Foi considerada uma força de 2000 N (200 quilos) aplicada igualmente nas áreas de apoio da base com o forno onde a maior tensão foi de 4,4 MPa, com isso garantimos que não ocorrerá deformação plástica no sistema. As imagens abaixo demonstram as cargas e tensões aplicadas no sistema.

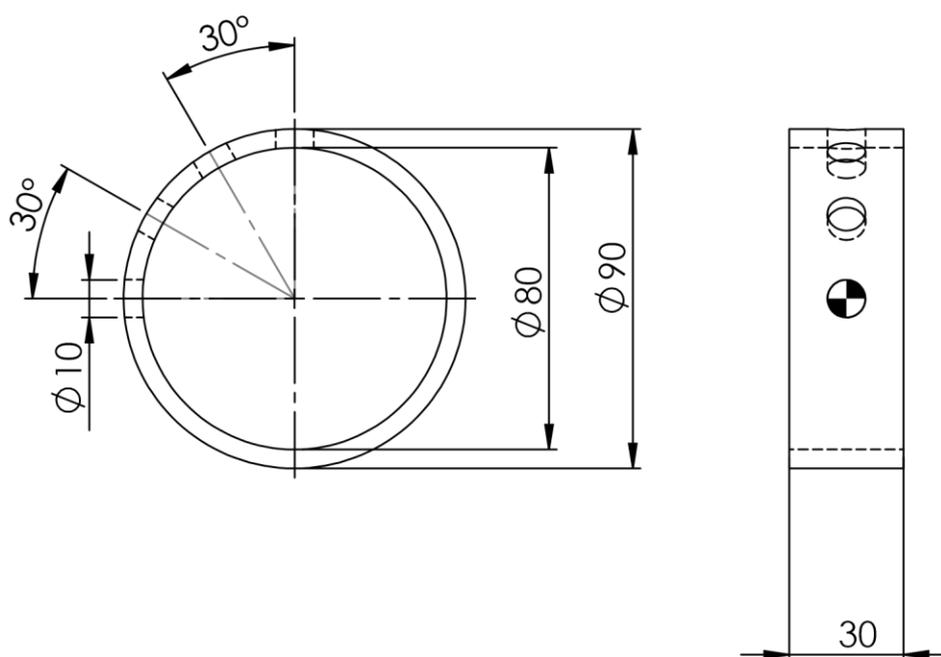


Apêndice C

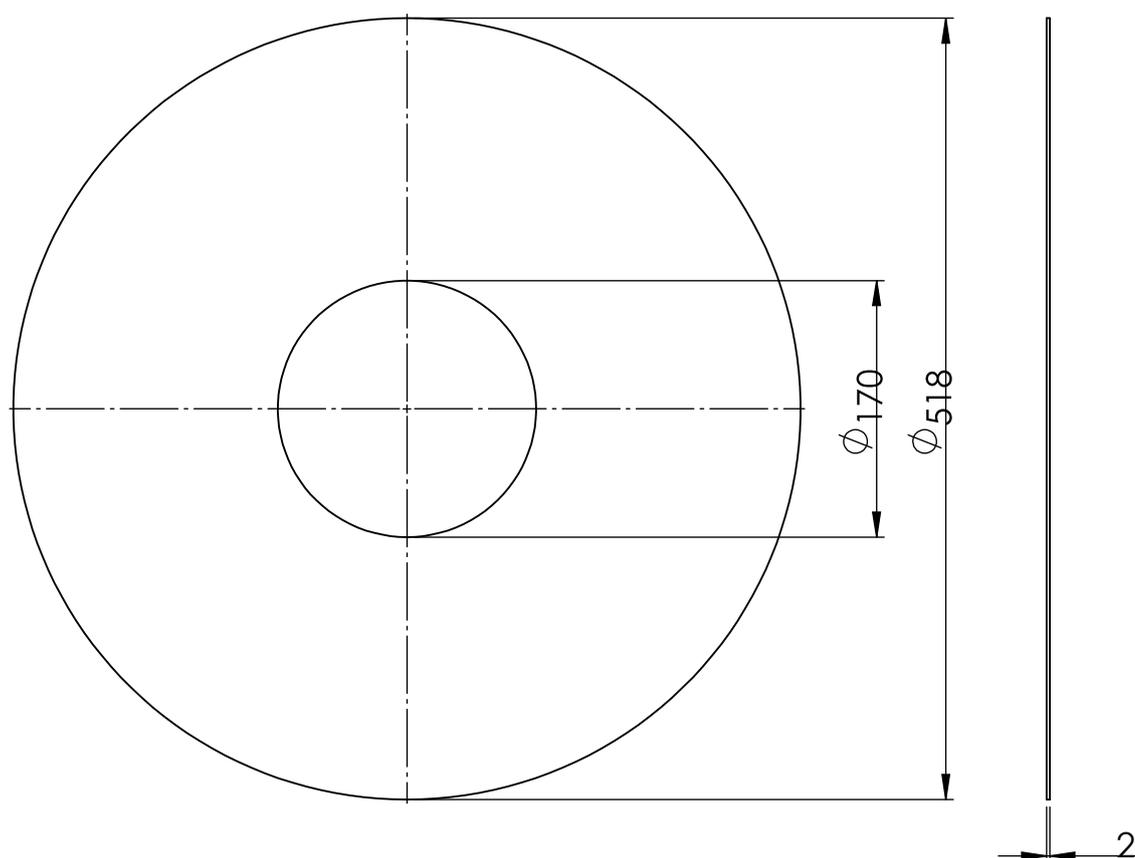
Desenhos técnicos



1	Alavanca	1	Tubo retangular 40 x 20 x 3,2
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões
	Universidade Federal da Paraíba	Título: Alavanca	
		Data: 08/04/2019	
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto: Forno de Fundição	
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	
		Escala: 1:5	
		Unidade: mm	

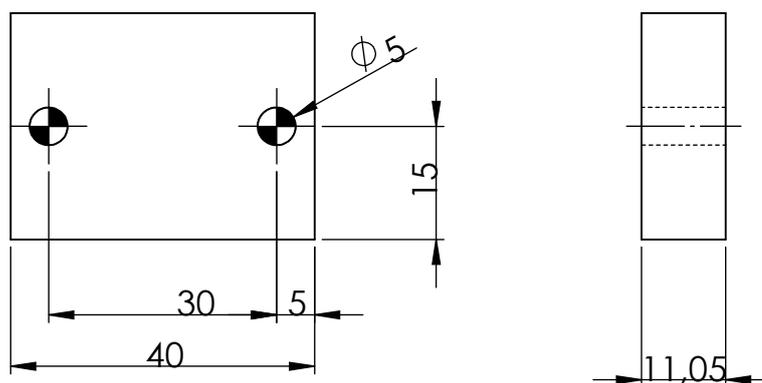


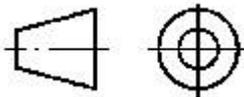
2	Anel da trava	1	Aço SAE 1020 3 5/8" x 40 mm
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões
	Universidade Federal da Paraíba	Título: Anel da trava	
		Data: 08/04/2019	
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto: Forno de Fundição	
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	
		Escala: 1:2	
		Unidade: mm	

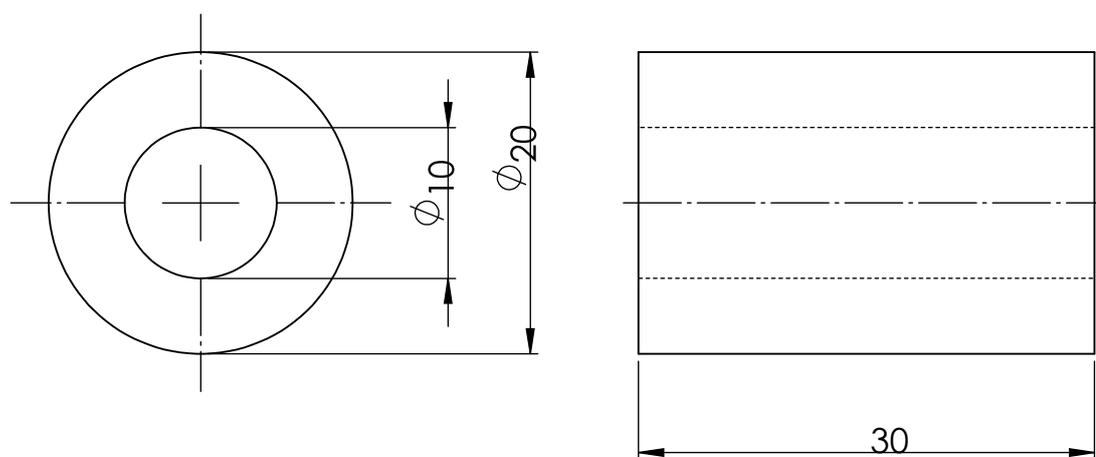


3	Tampa da carcaça superior	1	Chapa de aço 1020 de 2 mm
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões

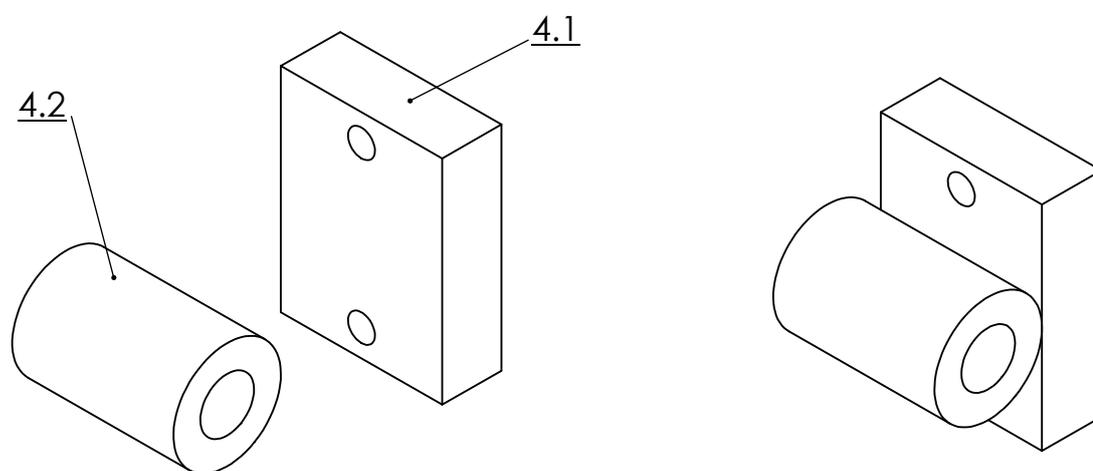
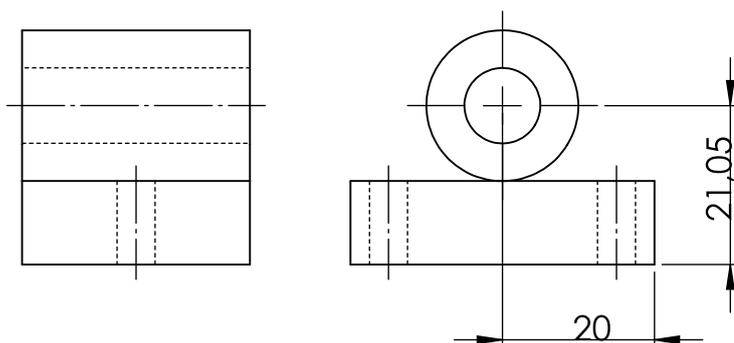
	Universidade Federal da Paraíba	Título: Tampa da carcaça superior	Data: 08/04/2019
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto: Forno de Fundição	
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	
		Escala: 1:5	
		Unidade: mm	



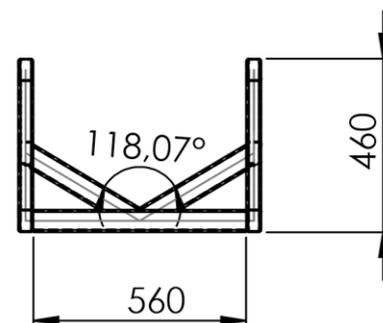
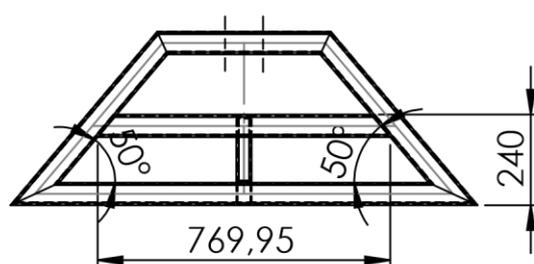
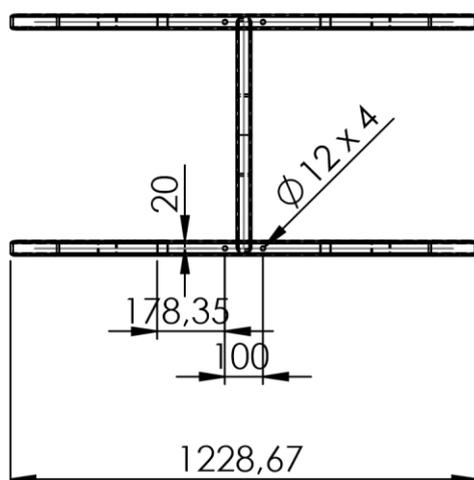
4.1	Base do guia da trava	2	Bloco de aço SAE 1020 45 x 15
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões
	Universidade Federal da Paraíba	Título: Base do guia da trava	
		Data: 08/04/2019 	
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto: Forno de Fundição	
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	
		Escala: 1:1	
		Unidade: mm	



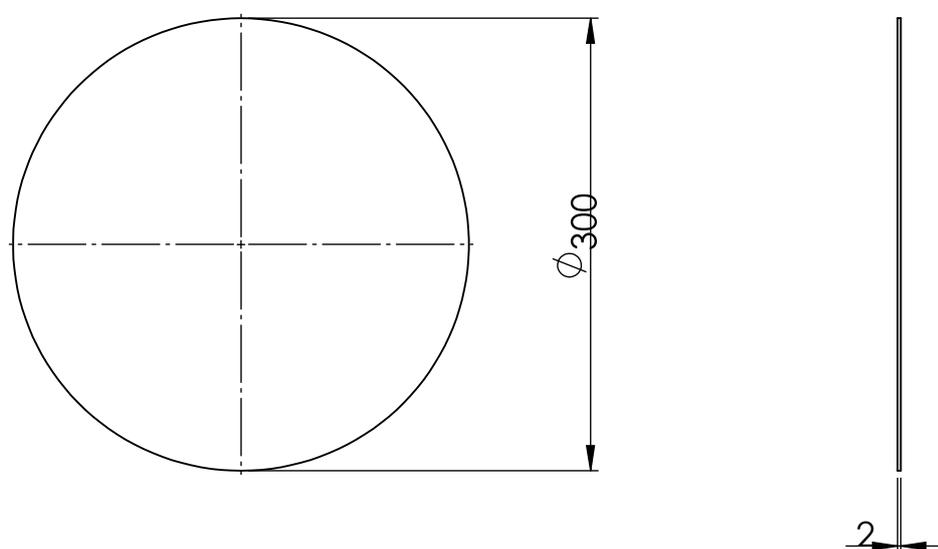
4.2	Guia da trava	2	Aço SAE 1020 1" x 35
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões
	Universidade Federal da Paraíba	Título:	
		Guia da trava	
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto: Forno de Fundição	
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	
		Data: 08/04/2019	
		Escala: 2:1	
		Unidade: mm	

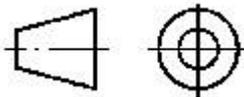


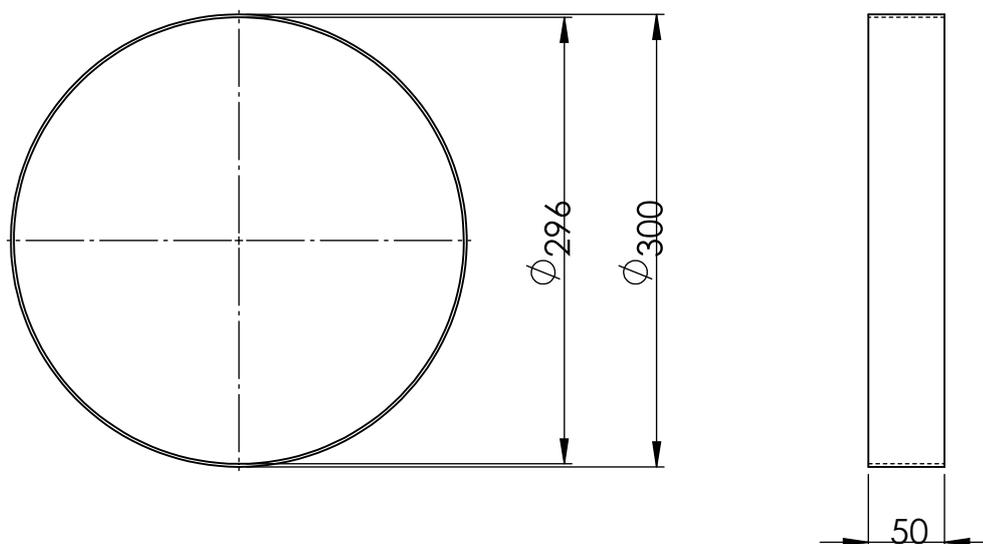
4.2	Guia	1	Aço SAE 1020 1" x 40
4.1	Base do guia	1	Aço SAE 1020 50 x 40 x 15
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões
	Universidade Federal da Paraíba	Título:	Data: 08/04/2019
			Guia da trava
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto:	Escala: 1:1
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	Unidade: mm

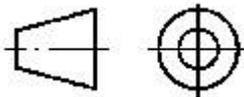


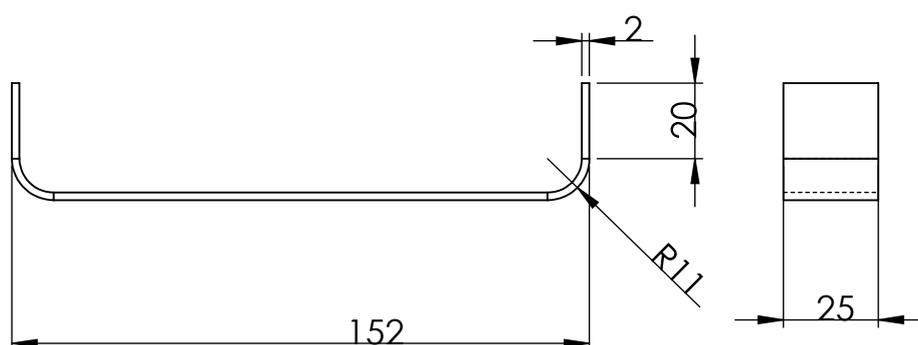
5	Base	1	Tubo retangular 40 x 20 x 3,2
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões
	Universidade Federal da Paraíba	Título: Base	
		Data: 08/04/2019	
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto: Forno de Fundição	
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	
		Escala: 1:20	
		Unidade: mm	

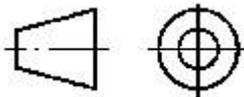


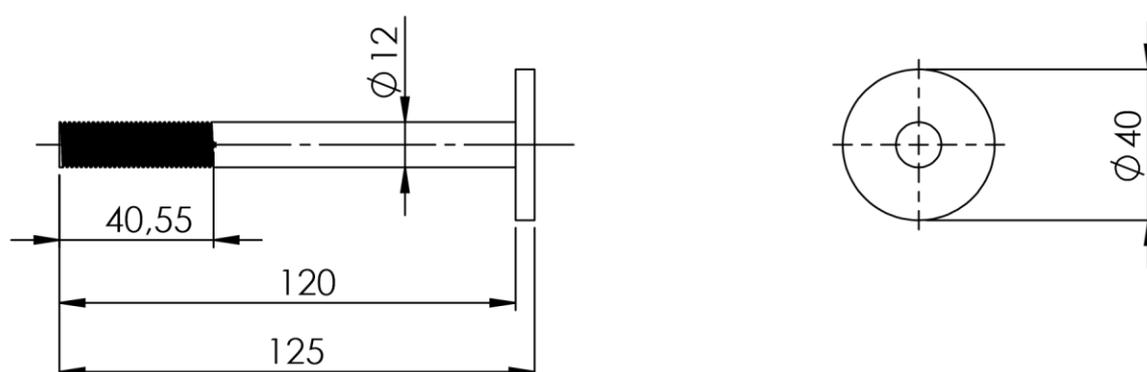
6.1	Tampa da escotilha	1	Aço SAE 1020 chapa 2 mm
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões
	Universidade Federal da Paraíba	Título:	Data: 08/04/2019
		Tampa da escotilha	
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto: Forno de Fundição	Escala: 1:5
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	Unidade: mm



6.2	Aro da tampa superior	1	Chapa de aço 1020 2mm
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões
	Universidade Federal da Paraíba	Título: Aro da tampa superior	
		Data: 08/04/2019 	
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto: Forno de Fundição	
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	
		Escala: 1:5	
		Unidade: mm	



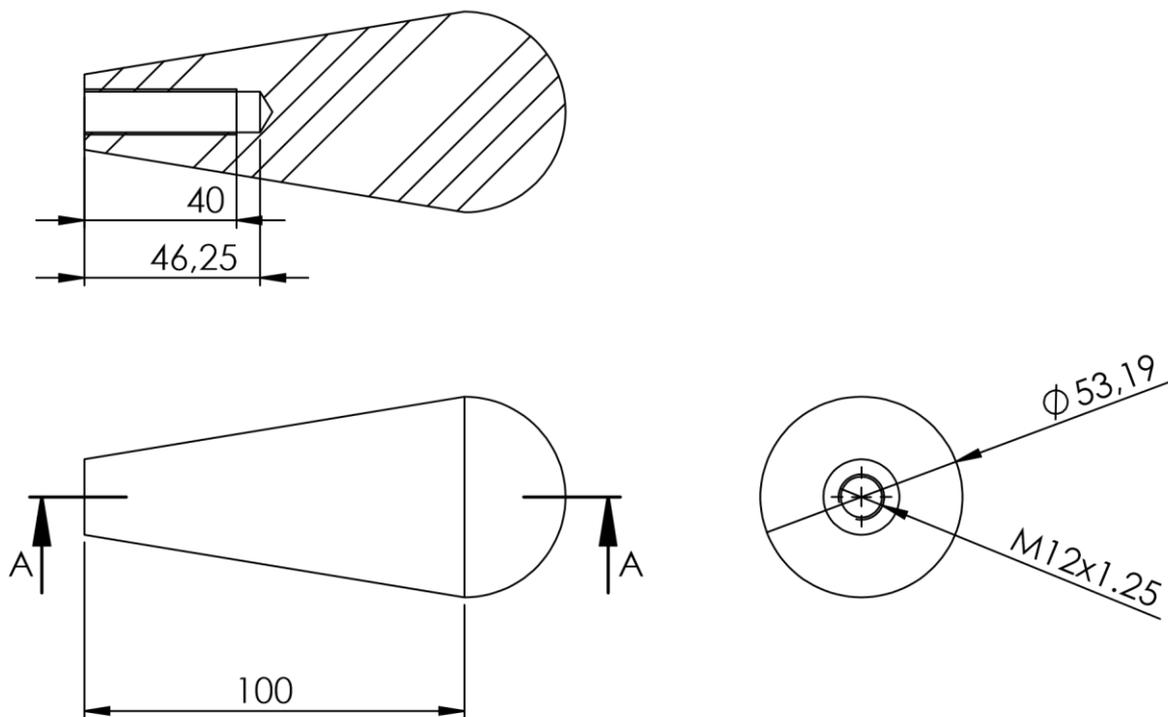
6.3	Suporte da dobradiça	1	Aço SAE 1020 200 x 25 x 2
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões
	Universidade Federal da Paraíba	Título:	Data: 08/04/2019
		Suporte da dobradiça	
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto:	Escala: 1:2
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	Unidade: mm

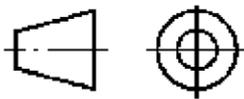


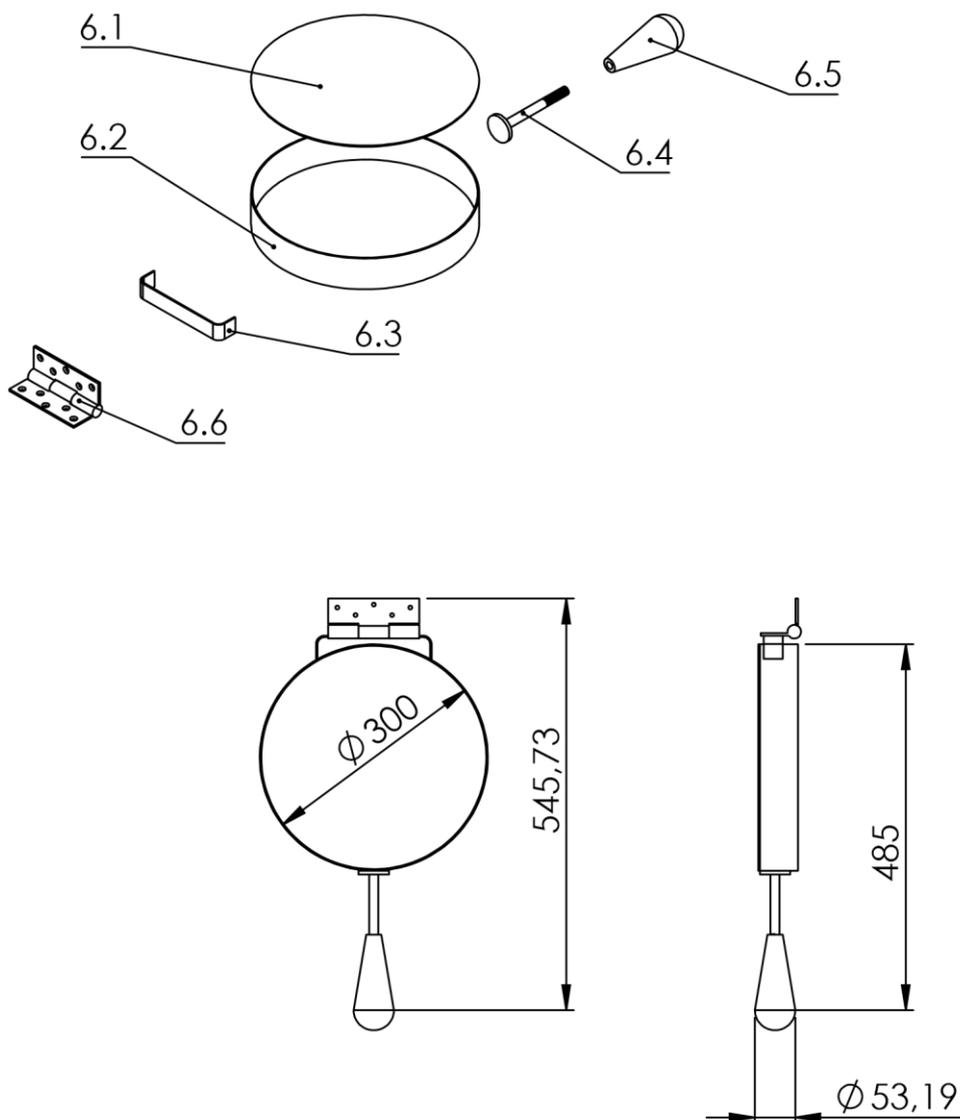
Rosca M12x 1,75

6.4	Suporte do puxador	1	Tarugo aço SAe 1020 2" x 140
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões
	Universidade Federal da Paraíba	Título: Suporte do puxador	
		Data: 08/04/2019	
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto: Forno de Fundição	
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	
		Escala: 1:2	
		Unidade: mm	

SEÇÃO A-A

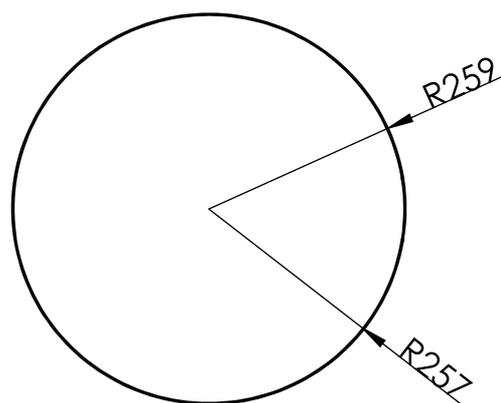
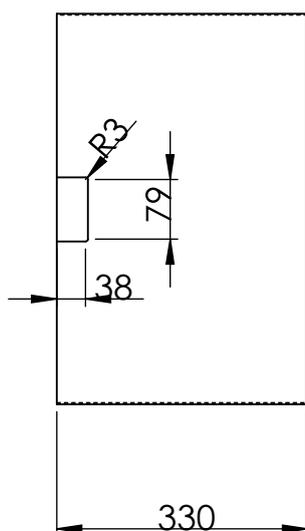


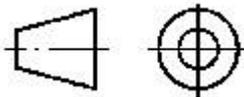
6.5	Puxdor	1	Tarugo PPS 2 1/4" x 140
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões
	Universidade Federal da Paraíba	Título:	Data: 08/04/2019
		Puxador	
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto: Forno de Fundição	Escala: 1:2
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	Unidade: mm

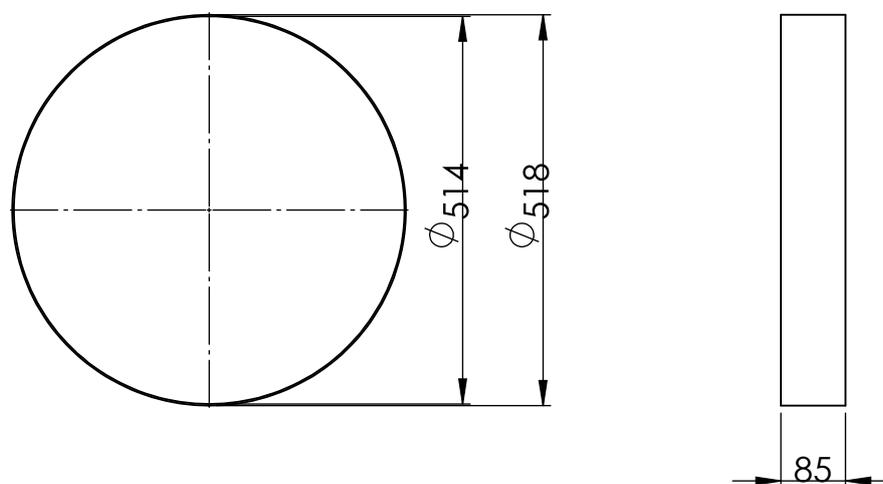


6.6	Dobradiça		Aço SAE 1010
6.5	Puxador		Tarugo PPS 2 1/4" x 140
6.4	Suporte do puxador		Tarugo aço SAE 1020 2" x 140
6.3	Suporte da dobradiça		Aço SAE 1020 200 x 25 x 2
6.2	Aro da tampa superior		Chapa de aço 1020 2 mm
6.1	Base	1	Tubo retangular 40 x 20 x 3,2
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões

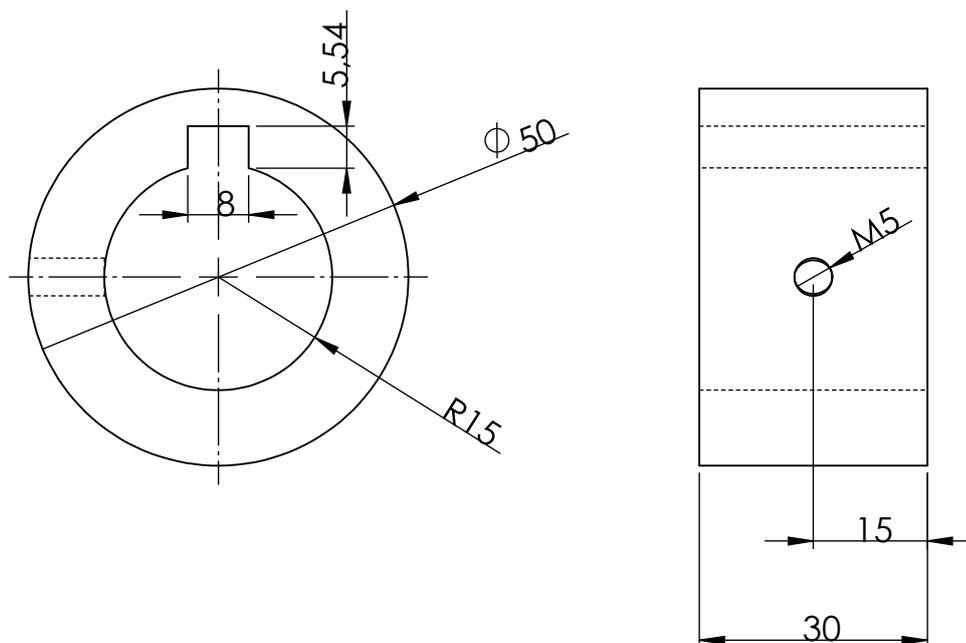
	Universidade Federal da Paraíba	Título: Tampa	Data: 08/04/2019
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto: Forno de Fundição	
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	
			Escala: 1:20
			Unidade: mm

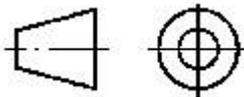


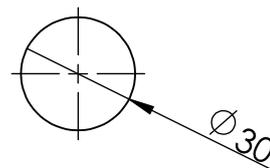
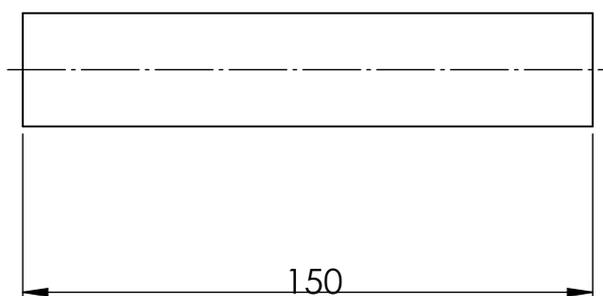
7	Carcaça principal	1	Chapa de aço 1020 2mm
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões
	Universidade Federal da Paraíba	Título: Carcaça principal	
		Data: 08/04/2019 	
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto: Forno de Fundição	
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	
		Escala: 1:5	
		Unidade: mm	

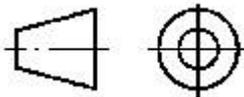


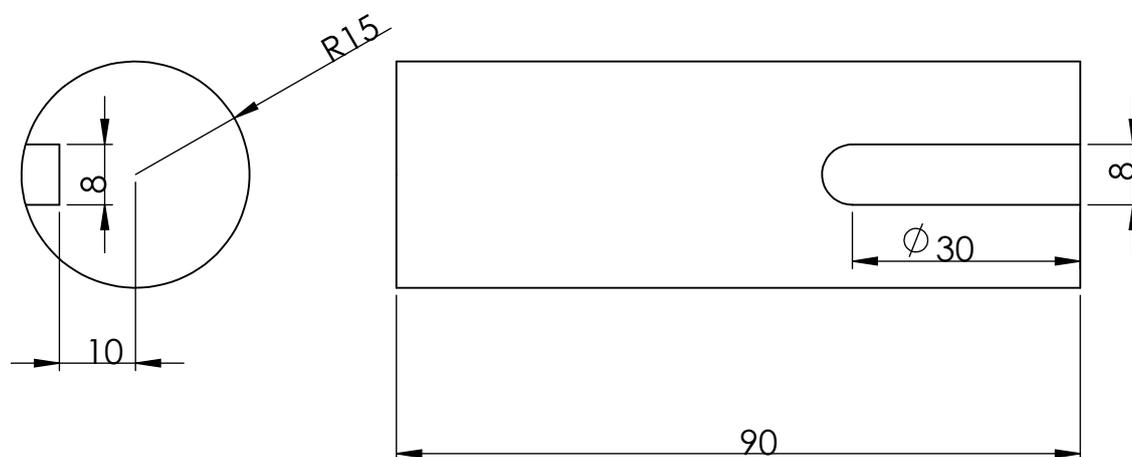
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões
8	Carcaça superior	1	Chapa de aço 1020 2mm
	Universidade Federal da Paraíba	Título: Carcaça superior	
		Data: 08/04/2019	
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto: Forno de Fundição	
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	
		Escala: 1:5	
		Unidade: mm	

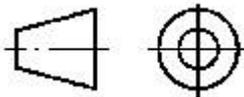


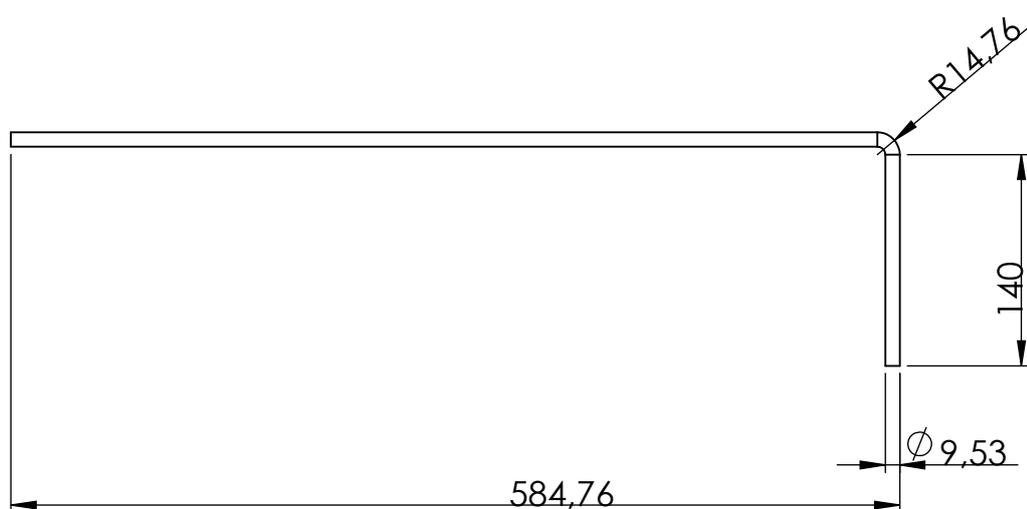
9	conexão da alavanca	1	Tarugo de aço SAE 1020 2" x 35
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões
	Universidade Federal da Paraíba	Título:	Data: 08/04/2019
		conexão da alavanca	
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto: Forno de Fundição	Escala: 1:1
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	Unidade: mm

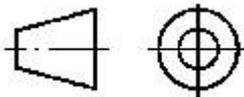


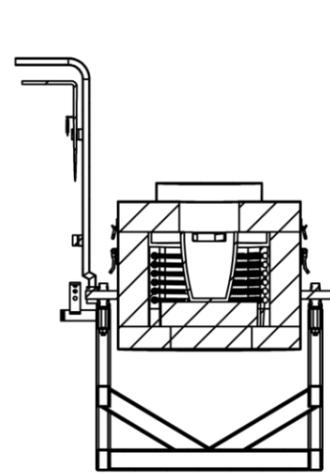
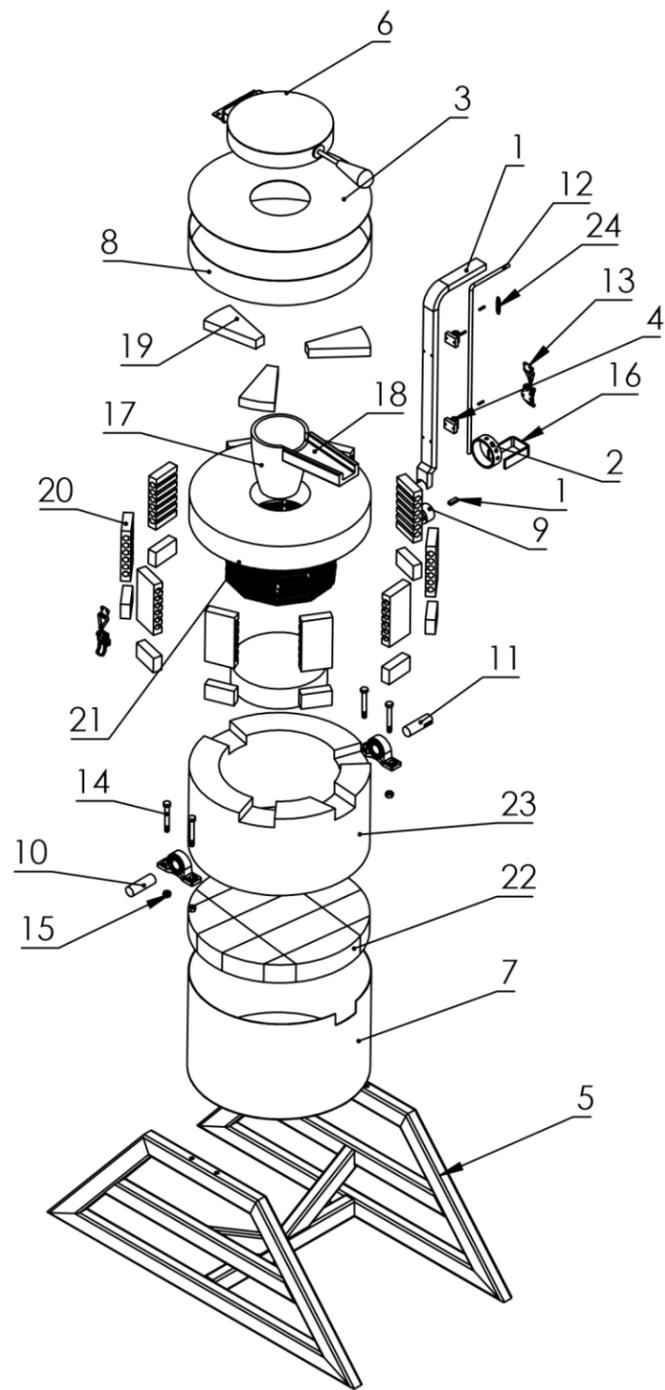
10	Eixo 1	1	Aço SAE 1020 1 1/4"x 155
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões
	Universidade Federal da Paraíba	Título: Eixo 1	Data: 08/04/2019
			
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto: Forno de Fundição	
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	
		Escala: 1:2	
		Unidade: mm	



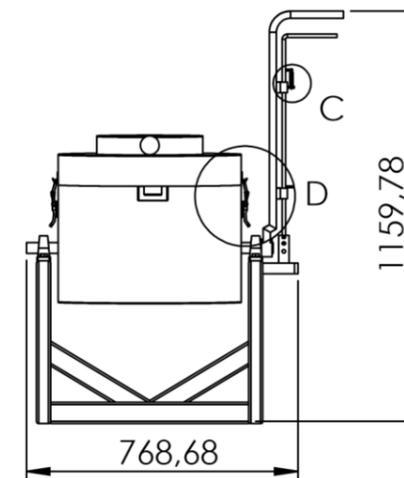
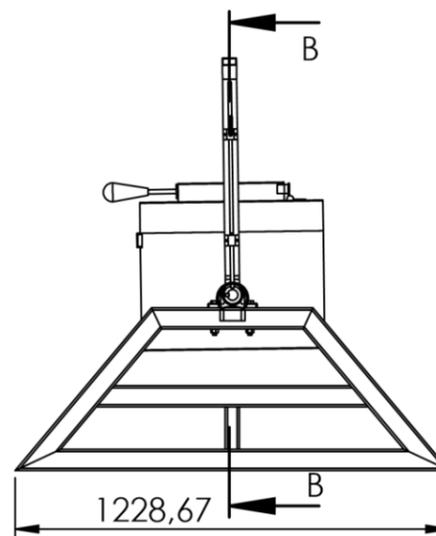
11	Eixo da Chaveta	1	Aço SAE 1020 1 1/4" x 100
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões
	Universidade Federal da Paraíba	Título:	Data: 08/04/2019
		Eixo da chaveta	
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto: Forno de Fundição	Escala: 1:1
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	Unidade: mm



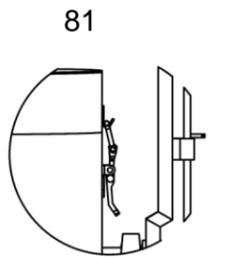
12	Trava da alavanca	1	Aço SAE 1020 3/8" x 700
Peça	Denominação e observações	Quant.	Material e dimensões
	Universidade Federal da Paraíba	Título: Trava da alavanca	
		Data: 08/04/2019 	
Desenhista: Guilherme Bernardo		Conjunto: Forno de Fundição	
Orientador: Koje Mishina		Projeto Final de graduação	
			Escala: 1:5 Unidade: mm



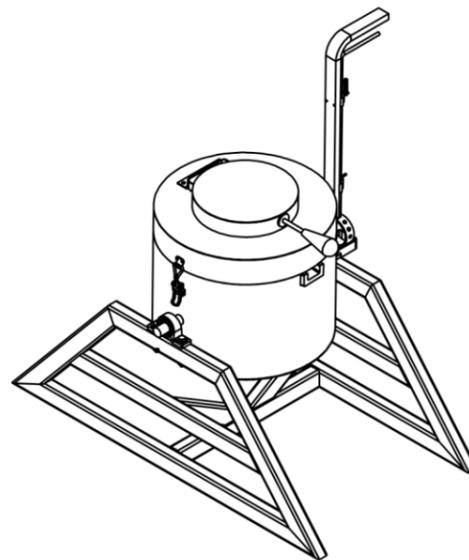
SEÇÃO B-B



DETALHE C
ESCALA 1 : 10



DETALHE D
ESCALA 1 : 10



24	Mola	1	Aço carbono
23	Revestimento	1	Fibra cerâmica Unifrax
22	Base de tijolo	1	Carbedo de silício
21	Resistência	1	KANTHAL A1-1 x 38m
20	Suporte da resistência	10	Carbedo de silício
19	Trava do cadinho	3	Carbedo de silício
18	Bico do cadinho	1	Carbedo de silício
17	Cadinho	1	Carbedo de silício
16	Suporte da trava	1	Aço SAE 1020 30 x 280 x 5
15	Porca M12	4	Aço SAE 1010
14	Parafuso M12	4	Aço carbono
13	Fecho de pressão	2	Aço inox
12	Trava da alavanca	1	Aço SAE 1020 3/8" x 700
11	Eixo da chaveta	1	Aço SAE 1020 1 1/4" x 100
10	Eixo 1	1	Aço SAE 1020 1 1/4" x 155
9	Conexão da alavanca	1	Tarugo de aço SAE 1020 2" x 35
8	Carcaça superior	1	Chapa de aço 1020 de 2 mm
7	Carcaça principal	1	Chapa de aço 1020 de 2 mm
6	Tampa	1	Ver desenho de conjunto
5	Base	1	Tubo de aço 1020 60 x 40 x 3,2
4	Guia da trava	2	Aço SAE 1020
3	Tampa da carcaça superior	1	Chapa de aço 1020 de 2 mm
2	Anel da trava	1	Aço SAE 1020 3 5/8" x 40 mm
1	Alavanca	1	Tubo retangular 40 x 20 x 3,2
Peça	Denominação e obsevações	Quant.	Material e dimensões



Universidade
Federal da
Paraíba

Título:

Montagem Geral
do forno

Data: 08/04/2019



Desenista:
Guilherme Bernardo

Conjunto:
Forno de Fundição

Escala:

Orientador: Koje Mishina

Projeto Final de graduação

Unidade: mm