



CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**PROJETO DE UM FORNO À RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA
FUNDIÇÃO DE ALUMÍNIO**

Darlan Henrique da Silva

Lajeado, novembro de 2016



Darlan Henrique da Silva

PROJETO DE UM FORNO À RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA FUNDIÇÃO DE ALUMÍNIO

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, na linha de formação específica em Engenharia Mecânica, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Lober Hermany

Coorientador: Prof. Me. Cristian Pohl
Meinhardt

Lajeado, novembro de 2016

RESUMO

O processo de fundição é hoje um dos processos mais utilizados na indústria, principalmente por ser um processo de fabricação com grande variabilidade, ou seja, é um processo que possibilita a fabricação de uma gama muito variada de peças, com geometrias complexas e dimensões extremamente variáveis, partindo de peças pequenas até a fabricação de peças extremamente grandes como partes de motores de navios, por exemplo. Deste modo, é de extrema importância que estudos sejam continuamente desenvolvidos para garantir uma boa qualidade dos diversos processos possíveis no meio da fundição. Nesta perspectiva, se desenvolveu o presente trabalho, que teve como principal objetivo a realização do projeto de um forno à resistência elétrica para fundição de alumínio, com o intuito de ser projetado e fabricado em uma universidade, desta maneira possibilitando a realização de práticas de fundição para uma compreensão otimizada por parte dos alunos de graduação. A metodologia proposta, baseia-se na aplicação das teorias de transferência de calor e massa para o dimensionamento dos elementos construtivos do forno, como também para a discussão dos resultados associados à presente pesquisa. Com a aplicação da metodologia proposta, foi possível alcançar os objetivos, e definir as dimensões dos principais elementos construtivos, como também determinar a quantidade de energia de aproximadamente 9,74 MJ, que é energia necessária para fundir o alumínio na capacidade máxima do cadinho que foi definido. Pôde-se também, determinar a potência total das resistências elétricas em 6000 W, que se fazem necessárias para transformar energia elétrica em energia térmica, que foi anteriormente definida. Também dimensionou-se a espessura do isolante térmico em 200mm, buscando uma baixa troca térmica, de maneira que se mantenha a temperatura interna necessária, e que a temperatura externa do forno seja a menor possível.

Palavras-chave: Forno. Resistência elétrica. Alumínio. Transferência de calor. Fundição.

ABSTRACT

The foundry process is today one of the most used process in the industrial world, mostly because is the most versatile process of all, allowing to manufacture a great diversity of components with geometric complexity and extremely variable measurements, starting from small pieces to huge components, as ship engine parts. This productive process is so important to the national industry that many researches must be done to ensure the good quality of all internal process in foundry. On this perspective that this paper has been developed, which has as main goal the project of an electrical resistance furnace for aluminum foundry, with the intention of being projected and fabricated in an university, to make possible the realization of practical lessons in foundry to optimize the student's understanding. The proposed methodology is based on the heat and mass transfer theories to design the furnace's constructive elements and to discuss the research results, using the heat transfer rate equations for heat conduction and convection. By using the presented methodology, it could be determined an energy quantity around 9,74 MJ, that represents the energy needed to melt the aluminum, considering the maximum capacity of the melting pot. Also, the electrical resistances total power could be defined as 6000 W, which are required to convert electrical energy into the thermal energy first defined. It was also to project the thermal insulating thickness in 200 millimeters, looking for a low thermal exchange, in a way to keep the internal necessary temperature, and that the furnace external temperature stays as low as possible.

Keywords: Furnace. Electrical resistance. Aluminum. Heat transfer. Foundry.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação de condutividade térmica	28
Equação 2 – Resistência térmica	29
Equação 3 – Taxa de calor transferida por radiação	31
Equação 4 – Taxa de transferência por convecção	31
Equação 5 – Coeficiente de transferência de calor por convecção natural	32
Equação 6 – Número de Nusselt para placa vertical	32
Equação 7 – Número de Rayleigh	33
Equação 8 – Número de Grashof	33
Equação 9 – Relação entre placas verticais e cilindros verticais para convecção natural	34
Equação 10 – Transferência de calor por condução	35
Equação 11 – Relação entre as equações de taxa de transferência de calor por condução e por convecção	41

LISTA FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos principais processos de fundição	17
Figura 2 – Ilustração das fases da moldagem em areia	18
Figura 3 – Ilustração das fases da moldagem em casca	19
Figura 4 – Equipamento utilizado para a moldagem sob pressão	20
Figura 5 – Ilustração das fases do processo de cera perdida	21
Figura 6 – Informações técnicas Cadinhos Corona linha A/F	39
Figura 7 – Condutividade térmica da Fibra cerâmica em função da temperatura	41
Figura 8 – Vista isométrica do forno	44
Figura 9 – Vista em corte do projeto	45
Figura 10 – Suporte para resistências elétricas	46

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades típicas dos cadinhos de acordo com o material	25
Quadro 2 – Fluxograma de atividades	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades termofísicas do alumínio em várias temperaturas	22
Tabela 2 – Propriedades da liga Kanthal	27
Tabela 3 – Exemplo de cálculo de resistência elétrica	28
Tabela 4 – Relação dos elementos construtivos	46

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Área (m ²)
ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
a.C.	Antes de Cristo
Cp	Calor Específico (J/(kg.K))
°C	Grau Célsius
CAD	Computer aided design
Fe	Emissividades do emitente
Fs	Emissividades da superfície
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
GLP	Gás liquefeito de petróleo
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m ² .K)
J	Joule
J/s	Joule por segundo
k	Condutividade térmica (W/(m.K))
K	Kelvin
kg	Quilograma
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
L	Comprimento característico (m)

m	Metro
m ²	Metro quadrado
MJ	Mega Joule
mm	Milímetro
Lf	Calor Latente (J/kg)
Q	Calor transferido em watts (J/s)
q	Fluxo térmico (W/m ²)
R	Resistência térmica (K/W)
T	Temperatura (K)
TCC I	Trabalho de conclusão de Curso - Etapa I
TCC II	Trabalho de conclusão de Curso - Etapa II
X	Comprimento
W	Watts
σ	Constante de Stefan-Boltzmann

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	12
1.1.1 Objetivo geral	12
1.1.2 Objetivos específicos.....	12
1.2 Delimitação do trabalho.....	13
1.3 Estrutura do trabalho	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 Fundição	15
2.2 Processos de fundição	16
2.2.1 Moldagem em areia	17
2.2.2 Moldagem em casca.....	18
2.2.3 Moldagem sob pressão.....	19
2.2.4 Processo de cera perdida.....	20
2.3 Alumínio.....	21
2.4 Fornos.....	23
2.4.1 Forno a resistência elétrica	24
2.4.2 Elementos construtivos do forno	24
2.4.2.1 Cadinho	25
2.4.2.2 Resistência elétrica.....	26
2.4.2.3 Isolamento térmico.....	28
2.5 Transferência de calor	30
2.5.1 Radiação	30
2.5.2 Convecção	31
2.5.2.1 Convecção natural	32
2.5.3 Condução.....	34
3 METODOLOGIA	36
3.1 Procedimento metodológico	36
4 DESENVOLVIMENTO.....	38
4.1.1 Entendimento dos requisitos do projeto.....	38
4.1.2 Definição da capacidade do forno	38
4.1.3 Dimensionamento das resistências elétricas	40

4.1.4 Dimensionamento do isolante térmico.....	40
5 RESULTADOS	44
6 CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS.....	48
ANEXOS.....	50
ANEXO A - Propriedades termofísicas dos gases a pressão atmosférica	51

1 INTRODUÇÃO

O alumínio, segundo ABAL (2007), apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, é o metal mais recente utilizado, em escala, pela indústria, que teve seu início somente em 1886. A descoberta desse novo material possibilitou a diversos processos industriais uma melhor relação entre resistência e peso. No Brasil, o alumínio teve sua utilização em escala industrial no ano de 1917, com a instalação da Companhia Paulista de Artefatos de Alumínio.

As características do alumínio permitem que ele tenha uma diversidade de aplicações viabilizando o fato de ser um dos metais mais utilizados no mundo todo. É um material leve, durável e bonito. O alumínio mostra um excelente desempenho e relação de suas propriedades, como por exemplo, a sua relação peso específico/resistência mecânica, que se mostra superior, na maioria das aplicações, se comparada com outros metais. ABAL (2007) traz ainda, que produtos que utilizam o alumínio ganham também competitividade, em função dos inúmeros atributos que este metal oferece, como leveza, elevada condução de energia, ótima relação de resistência/peso, resistência à corrosão, infinitamente reciclável e seu ponto de fusão a uma temperatura mais baixa, comparada a outros metais.

ABAL (2007) ainda afirma que a tendência da demanda por produtos de alumínio obriga à indústria a se adaptar à produtos e processos para acompanhar esse avanço. Um exemplo do aumento da demanda de alumínio é na linha automotiva, onde cada vez mais os componentes dos motores de veículos vêm sendo fabricados deste material, substituindo o ferro fundido. O conjunto de

processos, técnicas e metalurgia oferece uma base sólida para o desenvolvimento industrial, assim, as peças fundidas de alumínio apresentam hoje benefícios apropriados às necessidades sempre crescentes, em quantidade e qualidade, conquistadas pelo progresso industrial, com base no avanço do conhecimento científico e tecnológico.

Por ser leve, versátil, resistente e durável, o alumínio está conquistando destaque cada vez maior em vários setores da indústria, como, por exemplo, o setor automobilístico onde ele é aplicado em bloco de motores, caixa de câmbio, chassis e acessórios. No setor da construção civil ele é aplicado em coberturas de terminais rodoviários e ginásios poliesportivos.

Para suprir esta demanda crescente, existe a necessidade do constante estudo sobre as técnicas de fabricação onde este material é utilizado. Um dos principais processos de fabricação que faz a utilização do alumínio é a fundição. Baldman e Vieira (2014) afirmam que o processo de fundição é utilizado em diversos produtos, como, os já anteriormente citados, componentes de motores de automóveis. 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

Dimensionar um forno à resistência elétrica para a fundição de alumínio, que possa ser incorporado ao laboratório de Processos de Fabricação do Centro Universitário Univates, com o intuito de viabilizar práticas de fundição para alunos dos cursos de engenharia.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Aprofundar o conhecimento do autor na área de fundição;

- b) Aprofundar o conhecimento do autor na área de transferência de calor, considerando os três mecanismos de transferência: Condução, convecção e radiação;
- c) Dimensionar um forno a resistência elétrica com capacidade de fundir de 7 a 8 Kg de alumínio.

1.2 Delimitação do trabalho

Este trabalho se restringirá ao desenvolvimento teórico de um forno à resistência elétrica para fundição de alumínio. O presente trabalho pretende dimensionar todos os parâmetros necessários para a fabricação de um forno com uma finalidade de utilização em um laboratório de processos de fabricação

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, conforme apresentados a seguir. O primeiro capítulo trata do tema do estudo de caso, mostrando a importância e as vantagens do processo de fundição como também do alumínio, os objetivos gerais e específicos deste trabalho, uma descrição geral da estrutura do.

O segundo capítulo traz o referencial bibliográfico e teórico referente aos principais elementos construtivos presentes em um forno a resistência elétrica, citando diferentes autores e obras de referência no assunto para embasar a proposta do trabalho.

O terceiro capítulo apresenta a classificação da pesquisa científica e a metodologia de desenvolvimento do trabalho, trazendo o planejamento e a estrutura do projeto de um forno à resistência elétrica para fundição de alumínio, representada por um fluxograma. Todas as atividades que foram realizadas, contidas em cada fase, estão descritas neste capítulo.

O quarto capítulo apresenta o desenvolvimento e os resultados encontrados no dimensionamento do forno à resistência elétrica. E, por fim, o quinto capítulo apresenta a conclusão do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os conceitos teóricos dos processos envolvidos para a fundição, bem como características do material a ser fundido. São abordados também os processos de transferência de calor, além dos principais elementos construtivos de um forno à resistência elétrica.

2.1 Fundição

Segundo Baldman e Vieira (2014), o processo de fundição consiste no derramamento do metal, ou liga metálica, que se encontra no estado líquido para o interior de um molde, que consiste em uma cavidade no formato negativo da peça que se deseja obter. O processo de fundição é um dos processos mais versáteis atualmente utilizados, permitindo a fabricação de peças de alta complexidade e através do aprimoramento das técnicas, permite-se a obtenção de um acabamento de melhor qualidade em peças obtidas por esse processo. O primeiro relato de peças fundidas foi entre 5000 a 3000 a.C, com peças fundidas em cobre e tendo pedras lascadas como molde. Baldman e Vieira (2014) apresentam que, existem diferentes processos que podem ser adotados durante a fundição. Mas de maneira geral, todos eles devem obedecer às etapas básicas para que se possa conseguir fundir uma peça. Os processos básicos consistem em:

- Obter o desenho da peça que se deseja fundir;
- Projeto do modelo a ser utilizado;

- Confeção do modelo;
- Confeção do molde;
- Confeção dos machos;
- Fundir o metal;
- Vazamento do molde;
- Limpeza e rebarbação;
- Controle de qualidade.

Nos dias de hoje, a gama de aplicações com peças fundidas é ampla, as quais servem de base à várias áreas da indústria, e isto é possível graças a algumas características do processo. 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. Outro atrativo é a versatilidade na fabricação de moldes e modelos, tornando a fundição o processo com a maior liberdade de formas disponíveis.

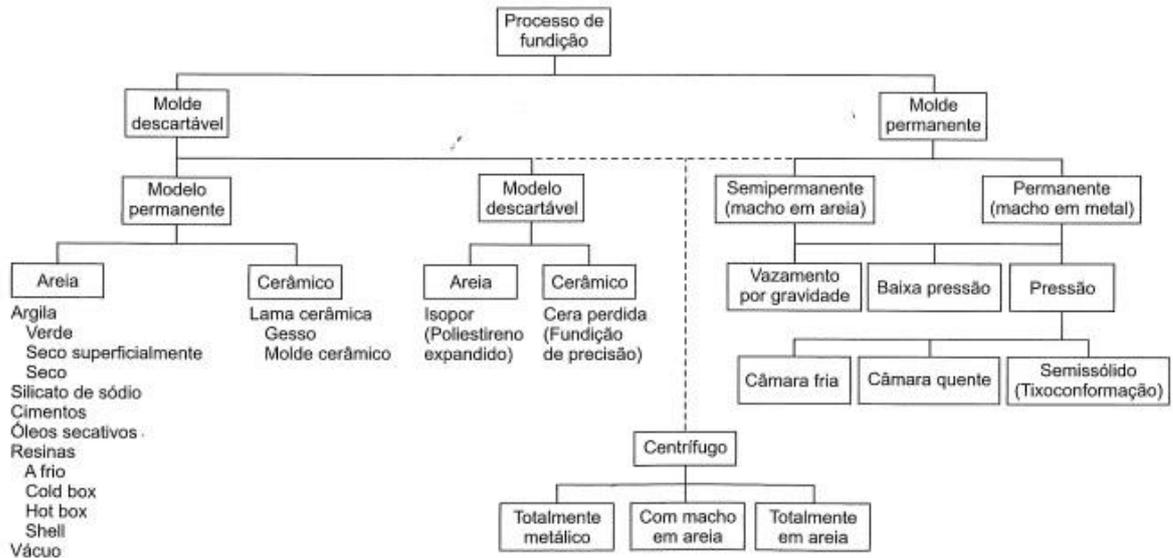
O ramo automotivo é uma das áreas onde o processo é largamente utilizado, possibilitando a fabricação de peças grandes, como o bloco e cabeçote do motor. A indústria também se faz valer desta técnica para a fabricação de carcaças de máquinas em geral, como fresadora e tornos. E além de possibilitar a fabricação de peças de grande porte, também possibilita a fabricação de peças extremamente pequenas e detalhadas, como jóias.

2.2 Processos de fundição

Desde o início da utilização do processo de fundição, muitos estudos foram realizados, aprimorando largamente o processo. Hoje existem diferentes tipos de fundição. Como é possível se perceber na Figura 1, a diferenciação entre os diferentes processos de fundição se inicia em moldes descartáveis e moldes permanentes. De acordo com Baldman e Vieira (2014) os principais seriam: moldagem em areias, moldagem em casca, sob pressão, *cold box*, fundição de precisão e centrífuga. Dentre tantos processos diferentes, no momento da escolha do processo ideal para a fundição de determinada peça, deve-se levar em

consideração alguns aspectos, como a dimensão da peça a ser produzida, o material que será utilizado para a fabricação, a geometria da peça e também o nível de acabamento esperado.

Figura 1 – Classificação dos principais processos de fundição

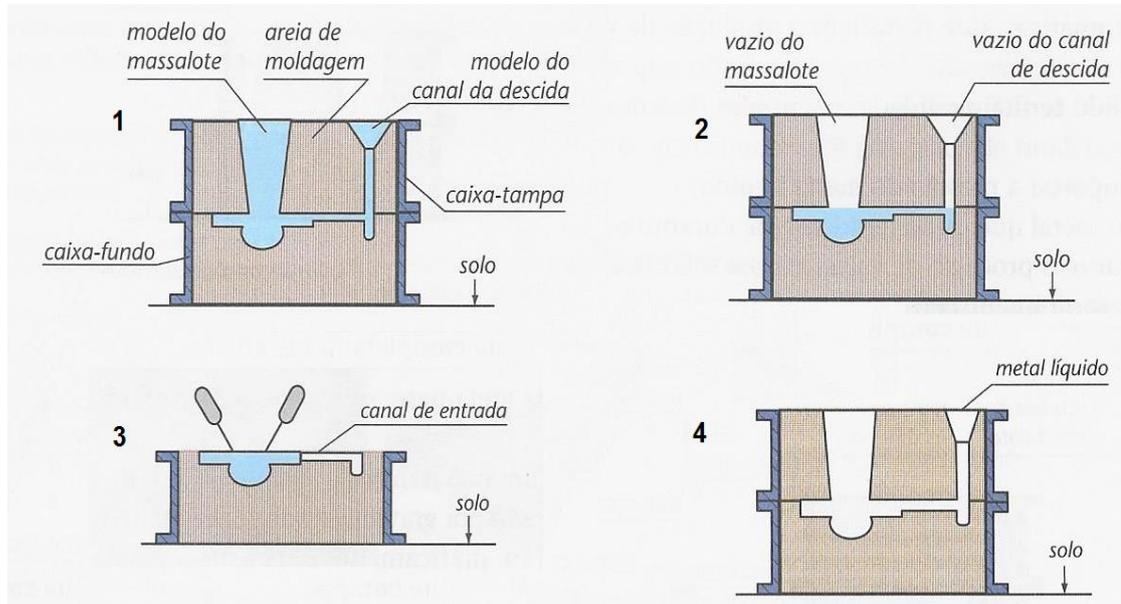


Fonte: Baldman e Vieira (2014, p. 29).

2.2.1 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. Para a obtenção do molde, envolve-se o modelo com a areia, deixando apenas um canal para a adição do material fundido e outro para o vazamento, conforme podemos observar na Figura 2. O molde só pode ser quebrado assim que o metal se solidifica, permitindo assim a retirada da peça. A areia utilizada na confecção do molde pode ser reutilizada na proporção de até 98%.

Figura 2 – Ilustração das fases da moldagem em areia

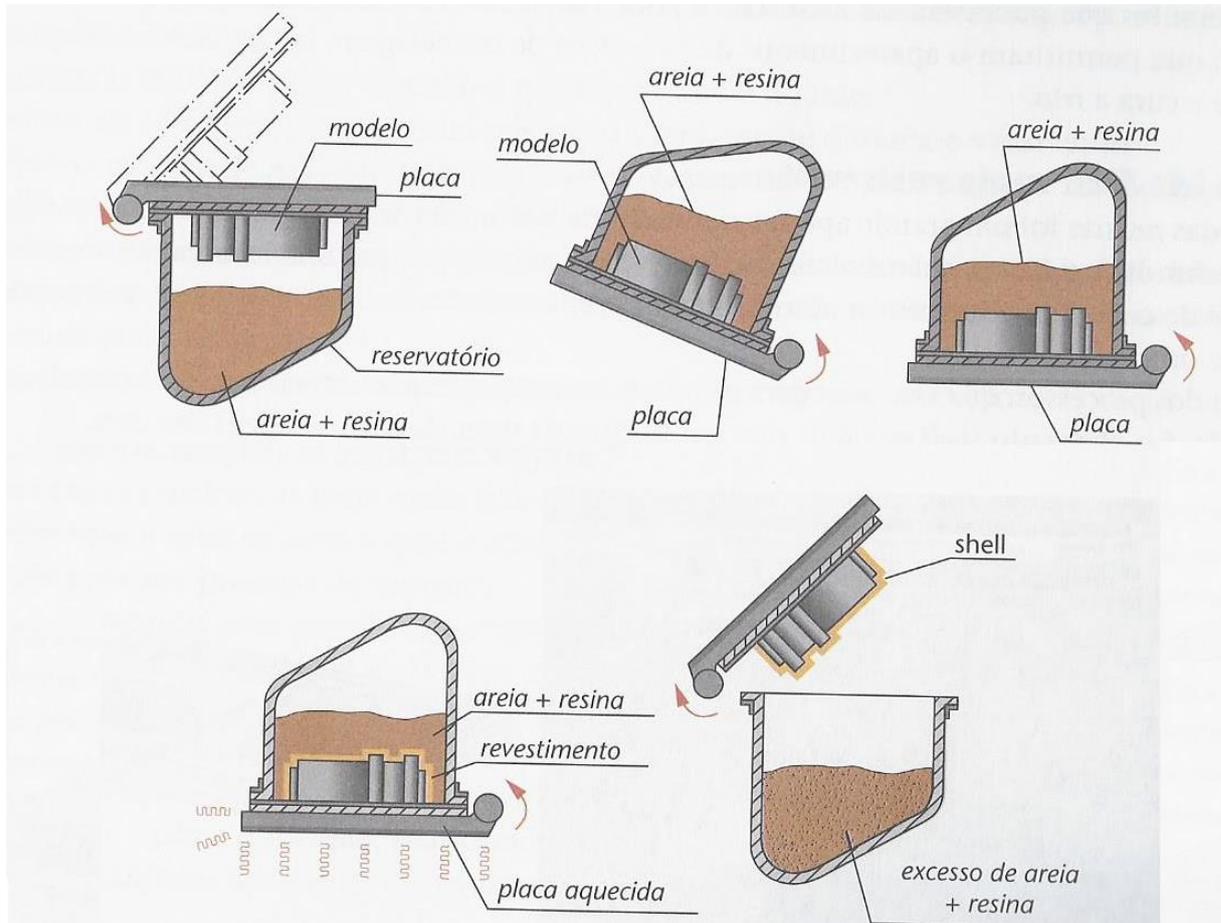


Fonte: Adaptado de Novo Telecurso – Processos de Fabricação 1 (2009, p. 28).

2.2.2 Moldagem em casca

O processo de moldagem em casca, ou também chamado de *Shell-moulding* também faz uso da areia, porém neste método a areia é misturada com uma 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 rotar o modelo. O modelo, após uma rotação completa, estará envolto em uma camada uniforme da mistura de resina e areia. É possível verificar uma ilustração deste processo na Figura 3. Neste processo é necessário que o modelo se encontre com uma temperatura de 230 a 270°C. A concentração de resina deve ser entre 3 a 10%. Ao entrar em contato com o modelo a resina irá se fundir e posteriormente se solidificar, desta maneira formando o molde. O modelo e molde são separados, permitindo assim o envase de metal líquido para a formação de novas peças.

Figura 3 – Ilustração das fases da moldagem em casca

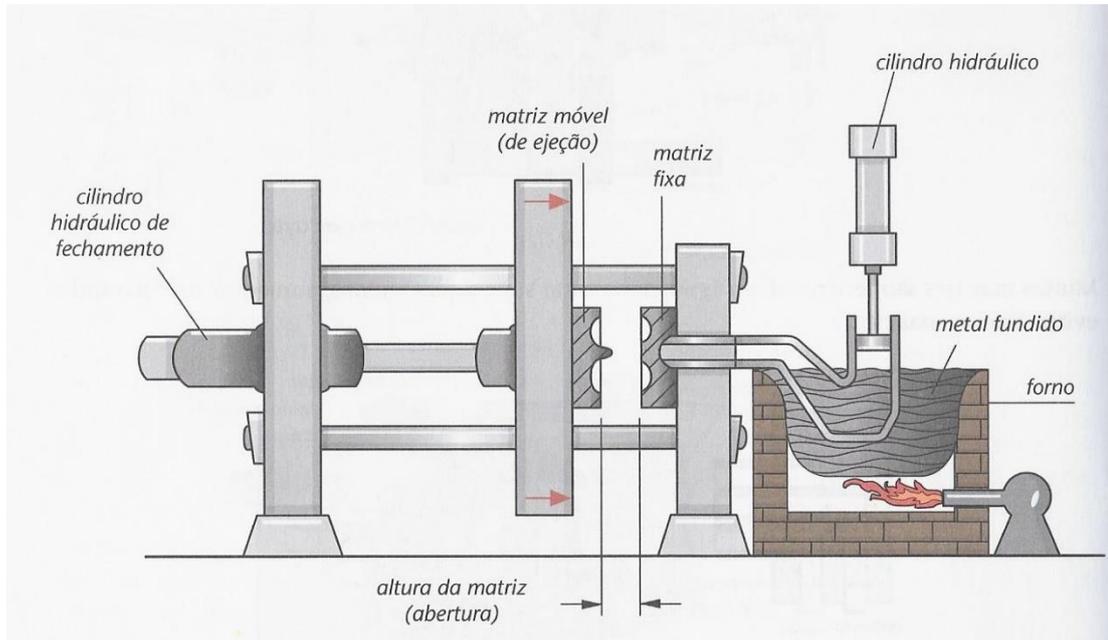


Fonte: Adaptado de Novo Telecurso – Processos de Fabricação 1 (2009, p. 32).

2.2.3 Moldagem sob pressão

Baldaman e Vieira (2014) afirmam que o processo de fundição sob pressão consiste em um processo onde o metal já fundido, com o auxílio de uma máquina específica para este processo, conforme pode ser observado na Figura 4, é bombeado para uma matriz através de um pistão hidráulico. Ainda sob pressão do pistão hidráulico, o metal preenche todos os espaços da matriz, e lá permanece até a sua solidificação. Após a solidificação o pistão recua, liberando a peça já pronta e possibilitando a injeção de material para mais uma peça. Este processo de fundição de metais é bem similar ao processo de injeção de polímeros. Em função do desgaste bastante acentuado das matrizes metálicas, este processo fica restrito a metais não ferrosos, com baixo ponto de fusão, como liga de alumínio e zinco.

Figura 4 – Equipamento utilizado para a moldagem sob pressão

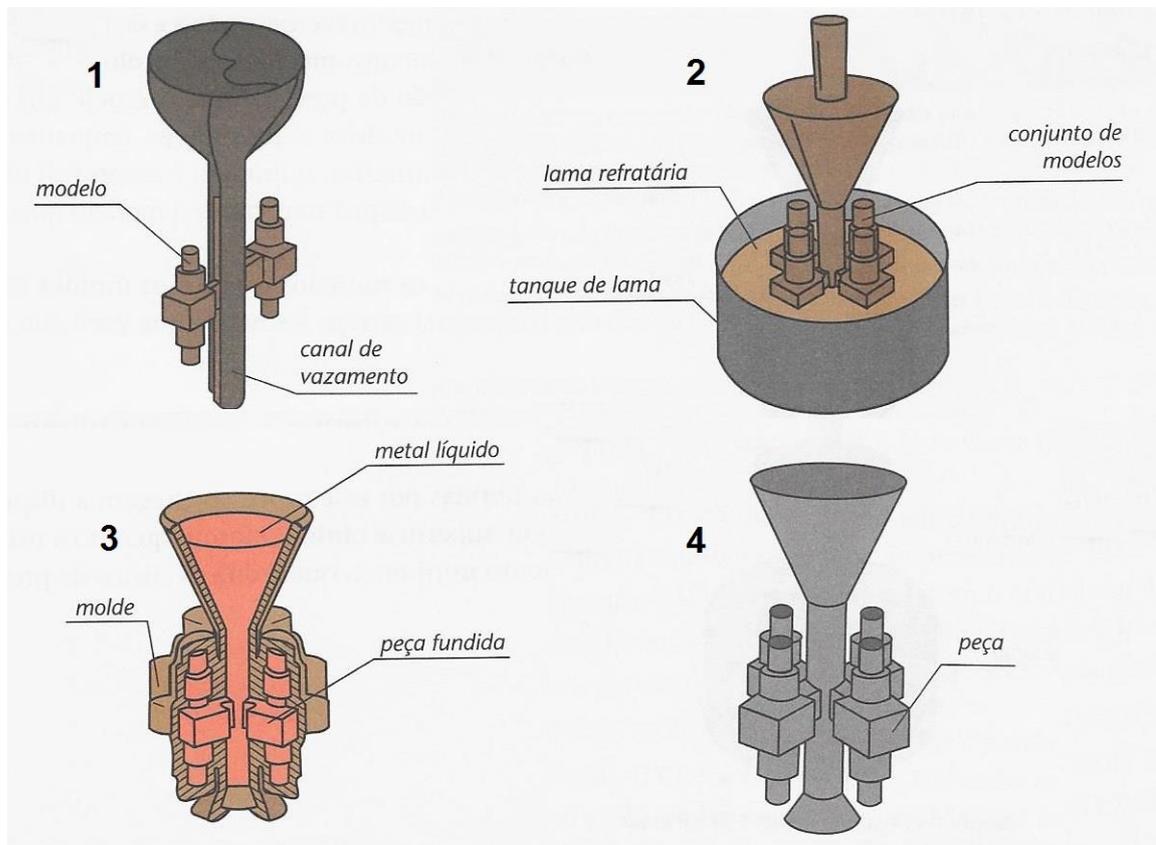


Fonte Adaptado de Novo Telecurso – Processos de Fabricação 1 (2009, p. 44).

2.2.4 Processo de cera perdida

Torre (2004) diz que o processo de cera perdida, 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. Este processo consiste em, normalmente por injeção, fabricar um modelo em cera. Este por sua vez, será coberto com uma lama cerâmica, normalmente sílica vítrea e posteriormente com grãos de sílica vítrea. Então areia e o material refratário são adicionados à esta camada inicial com a finalidade de agregar resistência ao molde. Após este processo finalizado, o molde é aquecido a fim de fundir e retirar por completo a cera de seu interior, assim já possibilitando o envase de metal fundido, conforme é possível verificar na Figura 5.

Figura 5 – Ilustração das fases do processo de cera perdida



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

2.3 Alumínio

Segundo Baldman e Vieira (2014) o alumínio teve o início de sua comercialização dado a cerca de 150 anos. O alumínio e suas ligas representam um dos materiais metálicos mais multifuncionais, tornando-o, além dos aspectos financeiros, atrativo para uma série de aplicações, como, por exemplo, na indústria de automóveis. Tendo uma densidade de apenas $2,7\text{g/cm}^3$, ele apresenta uma ótima relação de peso versus resistência mecânica, possibilitando assim a sua utilização na construção de estruturas móveis, como veículos e aeronaves, que necessitam cada vez mais uma resistência mecânica otimizada, e ao mesmo tempo uma redução de seu peso total. Um dos grandes prós do alumínio é a sua resistência à oxidação progressiva, pois o oxigênio da atmosfera, combinados com os átomos de sua superfície, formam uma camada protetora que impedem a progressão da deterioração. Sua resistência à corrosão pode ser aumentada através de

tratamentos térmicos, ou então adição de elementos de liga, formando assim as ligas de alumínio.

Segundo ABAL (2007), as ligas de alumínio caracterizam-se pela capacidade que o alumínio possui de dissolver outros metais e substâncias metaloides, desta maneira, tornando a estrutura do metal mais rígida. A estrutura e características da liga de alumínio variam de acordo com o elemento de liga presente. Um dos grandes atrativos do alumínio para a construção mecânica, é que pode se combinar com a grande maioria dos metais de engenharia. De acordo com as necessidades requeridas, é dimensionado qual o material de liga a ser adicionado, ou então qual a liga de alumínio a ser selecionada, partindo do pressuposto que uma só liga não pode combinar todas as propriedades ótimas para cada aplicação. “O grande alcance das ligas oferece à indústria uma grande variedade de combinações de resistência mecânica, resistência à corrosão e ao ataque de substâncias químicas, condutibilidade elétrica, usinabilidade, ductibilidade, formabilidade” ABAL (2007, p. 17). As ligas utilizadas para a fundição têm sua utilização específica, pois adquirem suas propriedades na condição de fundida. Um elemento de liga normalmente encontrado é o silício, que aumenta a fluidez, necessário para um bom vazamento, e também a resistência a trincas de contração que se origina quando o metal quente está a solidificar. ABAL (2007) ainda traz algumas características importantes do alumínio, como o ponto de fusão, que se dá aos 660°C para uma pureza de 99,80%. Na Tabela 1, Incropera (2011) traz algumas informações termofísicas do alumínio, que serão pertinentes aos cálculos necessários para o dimensionamento da quantidade de energia necessária para elevar a temperatura do alumínio.

Tabela 1 – Propriedades termofísicas do alumínio em várias temperaturas

Composição		CP (J/(kg.K))						Lf (J/kg)
Alumínio Puro	Temperatura	100	200	300	400	600	800	398,05
	CP	482	798	903	949	1033	1146	

Fonte: Adaptado de Incropera (2011, p. 588).

2.4 Fornos

Soares (2000) afirma que forno de fusão é o 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. Os fornos utilizados para a fundição de metais e suas ligas podem ser divididos em dois grupos:

- Fornos por aquecimento elétrico: A arco, podendo ser direto ou indireto; de indução, podendo ser a canal ou a cadinho e ainda o forno à resistência elétrica;
- Fornos por aquecimento a combustível: Carvão; óleo combustível; G.L.P. e ainda gás natural.

Estes fornos ainda podem ser diferenciados em função da sua estrutura: Cuba (Alto forno; cubilô), reverberação ou rotativo; de cadinho (Cadinho de aquecimento externo ou interno).

Segundo Baldman e Vieira (2014), uma mesma liga pode ser elaborada em mais de um equipamento. 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. Torre (2004) afirma que cada tipo de forno trabalha normalmente com uma faixa de ligas, como:

- O forno Cubilô normalmente utilizado para a fundição do ferro;
- Os fornos de reverberação e os conversores são utilizados normalmente para a fundição do aço e suas ligas;
- Os fornos de crisol, utilizados para a fundição do ferro, do aço das ligas leves e das ligas de cobre;
- Os fornos elétricos a arco são normalmente utilizados para a fundição do ferro e do aço;
- Os fornos elétricos à resistência são normalmente utilizados para a fundição de ligas leves;
- Os fornos elétricos de indução são utilizados para a fundição de toda classe de metais.

2.4.1 Forno a resistência elétrica

Torre (2004) diz que o emprego dos fornos elétricos traz uma série de vantagens, como a obtenção de peças fundidas de alta qualidade, principalmente porque o forno a resistência elétrica permite controlar com extrema precisão a composição do produto final obtido, desta maneira evitando a contaminação por elementos estranhos que possam vir a prejudicar o produto. Além de proporcionarem uma operação mais limpa, os fornos elétricos normalmente não necessitam tanto espaço físico para a sua instalação. São também mais fáceis de operar e controlar, não necessitando tão ampla experiência de operação quanto necessitaria outro tipo de forno, como o cubilô. Sua utilização fica restrita para a fundição de metais com um baixo ponto de fusão, que geralmente são alumínio e ligas leves, além de normalmente apresentar uma capacidade reduzida, se comparando com outros tipos de fornos. O fato de que o metal fundido não entra em contato com os combustíveis tanto quanto com gases oriundos da combustão, permite que peças obtidas com este tipo de equipamento apresentem uma alta qualidade. Qualidade esta que também se dá pelo fato de ser possível um perfeito controle de temperatura, através da utilização de pirômetros reguladores de ação automática.

Torre (2004) ainda afirma que sua estrutura é basicamente constituída de uma mufla de material refratário com alojamentos. Nestes alojamentos são dispostas as resistências de fio. No interior da mufla é acomodado o cadinho, normalmente de grafite ou então metálico. Baldman e Vieira (2014) afirmam que nesses fornos a passagem da corrente elétrica pela resistência a torna aquecida, desta maneira, irradiando o calor que irá fundir e sobre aquecer o metal. Ainda segundo os autores, a resistência pode se encontrar no interior ou no exterior do forno.

2.4.2 Elementos construtivos do forno

Torre (2004) afirma que o forno por resistência elétrica é basicamente constituído por três principais elementos: o cadinho, resistência elétrica e isolamento térmico.

2.4.2.1 Cadinho

Morganite (2005) diz que a finalidade do cadinho é de fundir os metais também de mantê-los neste estado em função da transmissão do calor de uma fonte de energia externa a ele. Esta transferência de calor se dá por duas maneiras, a condução e a irradiação. Morgan (2013) complementa que o cadinho moderno 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 em projeto. Cadinhos apresentam formas e capacidades variadas, podendo ser do tamanho de uma xícara ou então tendo a capacidade de comportar toneladas de metal. Podem também serem fixos no forno ou então removíveis.

Morgan (2013) afirma que os cadinhos apresentam características de desempenho diferentes, partindo de que para cada aplicação, tem-se um conjunto complexo de temperatura, propriedades químicas e parâmetros físicos que definem os limites técnicos em que o cadinho deverá operar. Morganite (2005) define algumas características a serem analisadas para a correta definição do cadinho a ser selecionado, como o tipo de metal a ser fundido, as diferentes temperaturas de fusão e também a forma de energia a ser utilizada para o aquecimento do metal.

Quadro 1 – Propriedades típicas dos cadinhos de acordo com o material

Propriedades	Grafite-argila	Grafite ligado a Carbono	Carbeto de Silício com Carbono
Transferência de calor	boa	boa	excelente
Refratariedade	muita 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 ligas de Al.	regular	regular	excelente

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

Morgan (2013) afirma ainda que fornos à resistência elétrica normalmente tem um aquecimento mais lento de que fornos de queima de combustíveis, desta maneira exigindo cadinhos com uma eficiência energética alta. Normalmente isso se dá em cadinhos com alto teor de carbono, pois conseguem fornecer uma alta condutividade térmica, proporcionando um derretimento mais rápido. Complementa o autor, que a sua forma acompanha o formato do forno, que normalmente é circular, para fornecer uma distância uniforme entre o cadinho e as resistências. Morganite (2005) 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.

2.4.2.2 Resistência elétrica

De maneira geral, 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. Esta resistência tem a capacidade de convergir a energia elétrica em energia térmica. Afirma também que cada material irá se comportar de maneira diferente a tensões para estabelecer uma corrente no seu interior.

Segundo Kanthal (2001) normalmente para a fabricação de resistência para aquecimentos em fornos se utiliza as ligas de Kanthal A1, liga esta composta de Ferro, Cromo e Alumínio. Esta liga, normalmente utilizada em fornos de altas temperaturas, como em tratamentos térmicos, fabricação de aços, suportando temperaturas de até 1400°C.

Tabela 2 – Propriedades da liga Kanthal

	KANTHAL APM	KANTHAL A-1	KANTHAL AF	KANTHAL D	NIKROTHAL 80	NIKROTHAL 70	NIKROTHAL 60	NIKROTHAL 40
Max continuous operating temp., °C	1425	1400	1300	1300	1200	1250	1150	1100
°F	2600	2550	2370	2370	2190	2280	2100	2010
Nominal composition, % Cr	22	22	22	22	20	30	15	20
Al	5.8	5.8	5.3	4.8	-	-	-	-
Fe	Rest	Rest	Rest	Rest	-	-	-	-
Ni	-	-	-	-	80	70	60	35
Resistivity at 20°C, Ωmm ² m ⁻¹	1.45	1.45	1.39	1.35	1.09	1.18	1.11	1.04
at 68°F, Ω/cm ²	872	872	836	812	655	704	668	626
Density, g/cm ³	7.10	7.10	7.15	7.25	8.3	8.1	8.2	7.9
lb/in ³	0.256	0.256	0.259	0.262	0.300	0.296	0.296	0.285
Coefficient of thermal expansion, K ⁻¹								
20-750°C, 68-1380°F	14.10 ^e	14.10 ^e	14.10 ^e	14.10 ^e	17.10 ^e	16.10 ^e	16.10 ^e	18.10 ^e
20-1000°C, 68-1836°F	15.10 ^e	15.10 ^e	15.10 ^e	15.10 ^e	18.10 ^e	17.10 ^e	17.10 ^e	19.10 ^e
Thermal conductivity at 20°C								
W m ⁻¹ K ⁻¹	13	13	13	13	15	13	13	13
68°F, Btu in ft ² hr ⁻¹ °F ⁻¹	90	90	90	90	104	90	90	90
Specific heat capacity								
KJ kg ⁻¹ K ⁻¹ , 20°C	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.50
Btu lb ⁻¹ °F ⁻¹ , 68°F	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.110	0.119
Melting point, °C	1500	1500	1500	1500	1400	1380	1390	1390
°F	2730	2730	2730	2730	2550	2515	2535	2535
Mechanical properties (approx.)*								
Tensile strength, N mm ⁻²	680	680	680	680	750	875	750	750
psi	99000	99000	99000	99000	109000	127000	109000	109000
Yield point, N mm ⁻²	445	445	445	445	450	450	450	450
psi	65000	65000	65000	65000	65000	65000	65000	65000
Hardness, Hv	230	230	230	230	180	185	180	180
Elongation at rupture, %	19	19	19	19	30	30	30	30
Tensile strength at 900°C, Nmm ⁻²	40	34	37	34	100	120	100	120
1650°F, psi	5800	5000	5400	5000	14500	17400	14500	17400
Creep strength at 800°C, N mm ⁻²	14	6	8	6	15	15	15	20
1000°C, N mm ⁻²	1.8	1	1.5	1	4	4	4	4
1470°F, psi	2000	870	1160	870	2160	2160	2160	2160
1830°F, psi	260	145	215	145	580	580	580	580
Magnetic properties	Magnetic (Curie point 600°C 1100°F)				Non		Slightly	
Emissivity, fully oxidized condition	0.70	0.70	0.70	0.70	0.88	0.88	0.88	0.88

Fonte: Kanthal Handbook-Resistance Heating Alloys and Systems for Industrial Furnaces (2001, p. 5).

Para o cálculo da resistência, Kanthal (2001) diz que deve se utilizar da tabela:

Tabela 3 – Exemplo de cálculo de resistência elétrica

Fios Kanthal A

De 10,0 a 0,050 mm de diâmetro Resistividade = 1,39 ohm.mm ² .m ⁻¹ Densidade = 7,15 g/cm ³	$\frac{\text{cm}^2}{\text{ohm}} = \frac{I^2 C_t}{p}$	Onde: I = corrente C _t = fator de temperatura p = carga superficial W/cm ²
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------

Para calcular a resistência na temperatura de trabalho, multiplicar pelo fator C _t da tabela abaixo:														
°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
C _t	1,00	1,00	1,01	1,01	1,02	1,03	1,04	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,06	1,06

Fonte: Adaptado de Kanthal Handbook – Resistance Heating Alloys and Systems for Industrial Furnaces (2001, p. 19).

2.4.2.3 Isolamento térmico

Incropera (2011) define isolante térmico como sendo um material que tem uma baixa dissipação de calor, em função de sua alta resistência térmica. Este material estabelece uma barreira à passagem do calor entre dois meios, que naturalmente tenderiam a igualar suas temperaturas rapidamente. Isso é possível quando os materiais apresentam baixa condutividade térmica. As vezes ainda é utilizado uma combinação de materiais com a finalidade de obtenção de uma condutividade térmica ainda menor.

A resistência térmica de condução de um material corresponde à dificuldade de transmissão de calor e é determinada pelo quociente entre a espessura do material e a sua condutibilidade térmica. Quanto menor for a condutibilidade térmica e maior a espessura do material, mais eficaz será o isolamento térmico.

Incropera (2011) diz que a equação de condutividade térmica como:

Equação 1 – Equação de condutividade térmica

$$k = \frac{q}{dT/dX} \quad (1)$$

Onde k é a condutividade térmica (W/(m.K))

q é o fluxo térmico (W/m²)

T é temperatura (K)

X é comprimento (m).

E que a equação da resistência térmica na condução é dada por:

Equação 2 – Resistência térmica

$$R = \frac{L}{(k \times A)} \quad (2)$$

Onde R é a resistência térmica (K/W)

L é o comprimento característico (m)

k é a condutividade térmica (W/(m.K))

A é a área (m²)

Segundo Chernack (2013) o projeto de engenharia e os materiais para revestimento escolhidos são os fatores chave no controle da eficiência e da utilização de energia dos equipamentos utilizados em equipamentos geradores de calor. E a eficiência térmica é a chave para maximizar a economia de energia consumida nestes equipamentos.

Rebernak e Chernack (2010) afirmam que os materiais utilizados no isolamento térmico de fornos são tanto fibras para alta temperatura quanto tijolos refratários. As fibras para altas temperaturas estão disponíveis tanto como fibras de cerâmicas refratárias como também isolantes bio-solúveis em diversas formas, incluindo: blocos, módulos, placas conformadas a vácuo e geometrias diversas. Também são disponíveis, para o isolamento de fornos, materiais refratários podendo incluir diversos graus de tijolos refratários. Estes materiais refratários oferecem propriedades físicas e estruturais excelentes para aplicação em isolamentos de fornos. Materiais alternativos, que não estão entre os isolantes típicos para altas temperaturas, são as fibras ordenadas, a sílica micro porosa e os refratários têxteis.

Resende (2011) contempla afirmando que no momento de decidir qual material a ser utilizado como isolamento térmico de um forno, alguns fatores devem ser levados em consideração, como, temperatura de operação, qual o regime de trabalho, qual o sistema de aquecimento, se existirá algum esforço mecânico sobre o revestimento, entre outros. E para o cálculo de perda de calor, Rebernak e Chernack (2010) dizem que os parâmetros de geometria do forno, como também a temperatura ambiente, a velocidade do ar no ambiente, a emissividade térmica da carcaça, a temperatura de operação do forno, a atmosfera e o fluxo de gás, se fazem necessários.

2.5 Transferência de calor

De acordo com Incropera (2011) transferência de calor pode ser entendido como o trânsito de energia provocado por um diferencial de temperaturas. Segundo Herring (2015) o aquecimento e resfriamento de peças acontecem em função de três mecanismos básicos: Radiação, convecção e condução.

2.5.1 Radiação

Herring (2015) afirma que radiação é o método de transferência de calor onde não acontece um contato direto entre a fonte de calor e o objeto a ser aquecido. A energia do campo de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas, desta maneira não necessitando de um meio material, ocorrendo de maneira mais eficiente quando no vácuo. Herring (2015) ainda ressalva que a perda de calor por radiação pode ocorrer em qualquer situação, se tornando mais efetiva ao modo em que a temperatura aumenta, justificando assim que os isolamentos em fornos de altas temperaturas precisam ser projetados de forma cuidadosa.

A taxa de calor transferida por radiação segundo Herring (2015) pode ser obtida pela equação:

Equação 3 – Taxa de calor transferida por radiação

$$Q = A \times \sigma \times F_e \times F_s \times (T_{radiador}^4 - T_{receptor}^4) \quad (3)$$

Q é o calor transferido em watts (J/s),

A é a área da superfície (m²),

σ é uma constante (Stefan-Boltzmann),

$F_e F_s$ são as emissividades do emitente e da superfície,

T é a temperatura do radiador e do receptor (K).

2.5.2 Convecção

Incropera (2011) define convecção como sendo o processo que ocorre quando existe o contato entre um fluido em movimento e uma superfície. Pode se dar por dois mecanismos, tanto pelo movimento molecular aleatório como também pelo movimento global.

Para calcular a taxa de transferência por convecção, Herring (2015) apresenta a equação:

Equação 4 – Taxa de transferência por convecção

$$Q = h_c \times A \times (T_{fluido} - T_{objeto}) \quad (4)$$

Onde: Q é o calor transferido em watts (J/s),

h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m².K),

A é a área da superfície (m²),

T é a temperatura (K)

2.5.2.1 Convecção natural

Incropera (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.

Para calcular o coeficiente de transferência por convecção natural, Incropera (2011) apresenta a equação:

Equação 5 – Coeficiente de transferência de calor por convecção natural

$$h = \frac{(Nu \times k)}{L} \quad (5)$$

Onde: h é o coeficiente de convecção natural(W/m².K)

Nu é o número de Nusselt

k é a condutividade térmica do material (W/m.K)

L é o comprimento característico (m)

Segundo Incropera (2011), o número de Nusselt é um valor baseado na análise dimensional, que correlaciona a transferência de calor de um fluido por convecção e por condução.

Nusselt pode ser definido pela equação:

Equação 6 – Número de Nusselt para placa vertical

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \times Ra^{\frac{1}{16}}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (6)$$

Onde Nu é o número de Nusselt

Pr é uma constante (número de Prandtl)

Ra é o número de Rayleigh.

Incropera (2011) traz que Rayleigh é simplesmente a relação entre a constante Prandtl com o número de Grashof, que pode ser definido por:

Equação 7 – Número de Rayleigh

$$Ra = Gr \times Pr = \frac{g \times \beta \times (T_s - T_\infty) \times L^3}{\nu \times \alpha} \quad (7)$$

Onde Ra é o número de Rayleigh

Gr é o número de Grashof

Pr é uma constante (número de Prandtl)

g é gravidade (m/s^2)

β é o coeficiente de dilatação térmica em K^{-1}

T_s é a Temperatura da superfície (K)

T_∞ é a temperatura do fluido (K)

L é o comprimento característico da geometria (m)

ν é a Viscosidade cinemática (m^2/s)

α é a Difusividade térmica (m^2/s)

Incropera (2011) ainda define Grashof como sendo para a convecção natural o que Reynolds é para a convecção forçada, ou seja, um número adimensional que relaciona a sustentação de um fluido com a sua viscosidade. E pode ser definido através da equação:

Equação 8 – Número de Grashof

$$Gr = \frac{g \times \beta \times (T_s - T_\infty) \times L^3}{\nu^2} \quad (8)$$

Onde Gr é o número de Grashof

g é gravidade em (m/s²)

β é o coeficiente de dilatação térmica em K⁻¹

T_s é a Temperatura da superfície (K)

T_∞ é a temperatura do fluido (K)

L é o comprimento característico da geometria (m)

ν é a Viscosidade cinemática (m²/s)

As equações apresentadas são somente válidas para paredes planas, porém incropera (2011) apresenta que tais cálculos também podem ser utilizados para cilindros verticais com altura L , desde que a seguinte relação seja obedecida:

Equação 9 – Relação entre placas verticais e cilindros verticais para convecção natural

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

Onde D é o diâmetro do cilindro (m)

L é o comprimento característico da geometria (m)

Gr é o número de Grashof.

2.5.3 Condução

Herring (2015) afirma que condução ocorre quando há o contato de dois objetos que se encontram com diferentes temperaturas. Com o contato, o calor irá fluir do corpo mais quente para o corpo mais frio, utilizando a diferença de temperatura como força motriz para essa transferência de calor.

Segundo Herring (2015), a equação para transferência de calor por condução é dada:

Equação 10 – Transferência de calor por condução

$$Q = k \times \frac{A \times (T_{\text{maisquente}} - T_{\text{maisfrio}})}{L} \quad (10)$$

Onde:

Q é o calor transferido em watts (J/s)

k é a condutividade térmica do material (W/m.K),

A é a área da superfície (m²)

$T_{\text{maisquente}} - T_{\text{maisfrio}}$ é a diferença de temperatura por todo o material em K

L é a espessura do material (m).

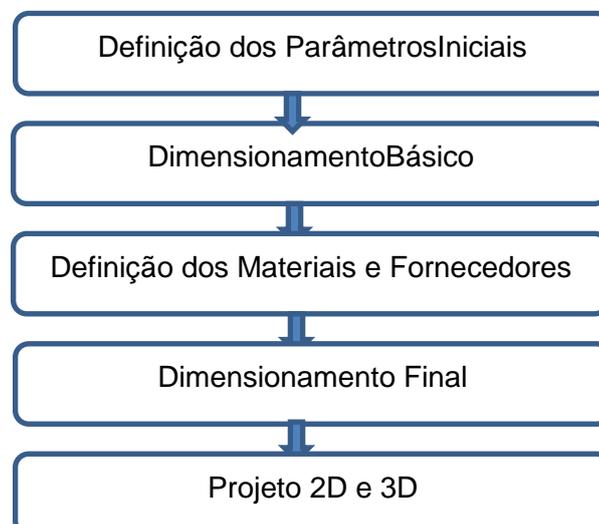
3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritas as etapas da metodologia que foram utilizadas neste trabalho.

3.1 Procedimento metodológico

O projeto do forno inicia-se com a definição dos recursos disponíveis para a sua elaboração. Um cronograma de atividades foi elaborado, baseado nos conhecimentos bibliográficos estudados, de maneira que se possam atingir os objetivos propostos pelo autor no capítulo introdutório deste trabalho.

Quadro 2 – Fluxograma de atividades



Fonte: Do autor (2016).

Agora é apresentada de maneira detalhada cada atividade abordada no fluxograma.

Atividade1: Inicialmente na elaboração de um forno, já sabendo que o forno será à resistência elétrica e para fundir alumínio, foi definida qual a capacidade de fundição que o forno apresentará, a temperatura máxima admitida no exterior do forno, como também algumas dimensões externas máximas, já que o espaço físico, onde pretende-se implementar o equipamento é limitado.

Atividade 2: foi realizado o dimensionamento inicial dos elementos construtivos, visando obedecer aos parâmetros definidos na atividade 1.

Atividade 3: Nesta atividade, baseado no dimensionamento inicial realizado na atividade dois, se buscou encontrar no mercado fornecedores e produtos que atendam as especificações definidas para o projeto.

Atividade 4: Já de posse das características de cada matéria, como as características do cadinho, da resistência e do isolante térmico pelos fornecedores, será possível dimensioná-los definitivamente, em função das definições previamente estabelecidas. Para esse dimensionamento, serão utilizados os conceitos teóricos pesquisados, como também serão necessárias as equações de transferência de calor, tanto por condução, como por convecção e radiação.

Atividade 5: Nesta etapa, já de posse de todos os cálculos e dimensionamento dos componentes, foi realizado o projeto em 3D, com o auxílio de um software de CAD, posteriormente também um projeto em 2D, para que auxilie no momento da fabricação.

4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo apresenta-se a definição e desenvolvimento dos cálculos realizados para o dimensionamento dos principais elementos construtivos do forno.

4.1.1 Entendimento dos requisitos do projeto

Após a análise dos objetivos selecionados para o projeto deste forno, se percebeu a necessidade de utilizar como principal dado de entrada a capacidade de matéria prima a ser utilizada no forno. Tratando-se de um forno com a finalidade de utilização sendo laboratorial, para realização de práticas acadêmicas. Foi definida a capacidade de fundição de 7 a 8 kg de alumínio. A seguir serão detalhadas as dimensões e cálculos utilizados para satisfazer as necessidades e especificações do projeto.

4.1.2 Definição da capacidade do forno

A delimitação da capacidade de fundição do forno será a responsável pelos demais dimensionamentos. Como a finalidade do uso do forno é laboratorial, e não industrial, foi selecionada uma capacidade de fundição baixa, se comparada a fornos utilizados industrialmente. Com a definição da capacidade em torno de 3 litros, o que corresponde a aproximados 8 kg de alumínio, buscou-se encontrar o melhor produto disponível no mercado, para que atendesse essa especificação. Desta maneira o

produto selecionado foi o Cadinho tipo A/F tamanho 16 do fornecedor Corona Cadinhos, que possui uma capacidade de fundição de até 7,8 kg de alumínio, conforme se pode observar na Figura 6.

Figura 6 – Informações técnicas Cadinhos Corona linha A/F



Fonte: Catálogo técnico Corona Cadinhos (2013, p. 3).

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.

4.1.3 Dimensionamento das resistências elétricas

Já determinado a quantidade máxima de alumínio a ser utilizada no forno, pode-se definir a quantidade de energia que será necessária para elevar a temperatura do alumínio até a temperatura de fusão.

Conforme ABAL sabe-se que a temperatura de fusão do alumínio puro é de 660°C, podendo variar de acordo com as suas ligas. Desta maneira, será considerada a temperatura máxima do forno em 800°C, assim possibilitando a fundição de uma liga de alumínio que venha a ter seu ponto de fusão a uma temperatura mais elevada.

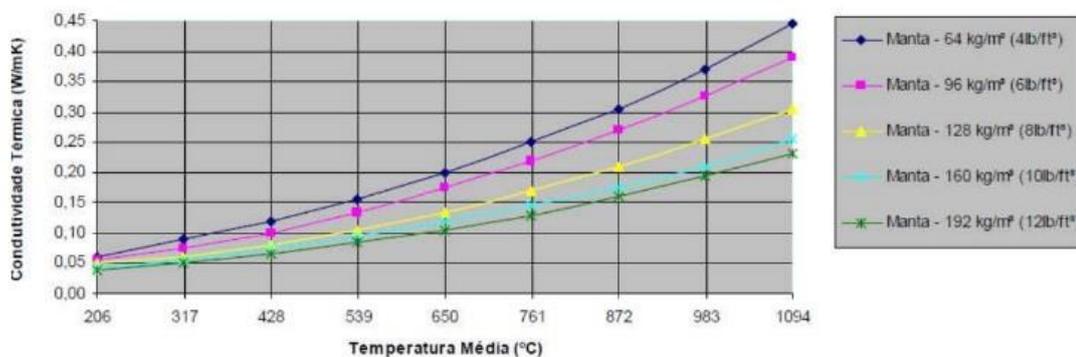
Através da Tabela 1, do anexo, é possível verificar, ao longo de uma faixa de temperaturas, a quantidade de energia que é necessária para elevar a temperatura do alumínio a cada Kelvin. De posse desta tabela, da temperatura máxima a qual o alumínio deve atingir e também da máxima massa de alumínio que será utilizada, é possível definir qual a quantidade de energia necessária para realizar esse procedimento. É possível concluir que para levar a temperatura do alumínio da temperatura ambiente, que foi considerada como sendo de 20°C até a temperatura de 800°C, será necessária a quantidade de 9.733.915,67 J, ou então 9,74 MJ. Foi definido para este equipamento, que o tempo satisfatório para esse ganho de temperatura, seria de 30 minutos. Para obedecer a essa especificação, e sabendo que a unidade de medida de potência W é composta por J/s, é possível concluir que a resistência com potência de 1000 W forneceria a energia necessária em 167 minutos. Não obedecendo a especificação, foi necessário refazer os cálculos com uma potência maior, até a definição em 6000 W, que irá fornecer ao alumínio a energia necessária em satisfatórios 27 minutos.

4.1.4 Dimensionamento do isolante térmico

O isolante térmico deve ser dimensionado de tal maneira que obedeça a uma transferência de calor desejada entre o ambiente interno e o ambiente externo do forno. A temperatura externa máxima admissível para o forno foi definida em 55°C, para que a operação do forno se torne segura, com o objetivo de evitar acidentes

durante a utilização. Após consulta com fornecedores de isolante térmico, foi possível verificar que, em função da faixa de temperatura de trabalho do forno, poucos materiais podem ser utilizados para o isolamento. Para este forno, o material isolante selecionado foi a fibra cerâmica, com densidade de 192 Kg/m³, que pode ser utilizada em temperaturas de até 1315°C fornecida por Refratil Refratários. Na Figura 7 é possível verificar a condutividade térmica da manta em função da temperatura de trabalho.

Figura 7 – Condutividade térmica da Fibra cerâmica em função da temperatura



Fonte: Folha de dados técnicos Refratil – Manta de fibra cerâmica (2016,p. 1).

Para a definição da espessura do isolante térmico que será necessário para o forno, foi estabelecida uma relação entre as Equações 4 e 10, conforme mostrado a baixo:

Equação 11 – Relação entre as equações de taxa de transferência de calor por condução e por convecção

$$h_c \times A \times (T_{fluido} - T_{objeto}) = k \times \frac{A \times (T_{maisquente} - T_{maisfrio})}{L} \quad (11)$$

Todos os dados necessários para a resolução da equação a cima são conhecidos, com exceção do coeficiente de convecção natural da parede externa do forno com o ambiente. Inicialmente será necessário consultar o anexo A, onde é possível encontrar as propriedades termofísicas do ar. Considerando que a

temperatura do ambiente seja de 20°C e que a temperatura máxima desejada na parede externa do forno seja de 55°C, e através da Equação 7, pode-se definir Ra.

$$Ra = Gr \times Pr = \frac{g \times \beta \times (T_s - T_\infty) \times L^3}{\nu \times \alpha} = 86.257.268,72.$$

Já de posse do valor de Ra, através da Equação 6, é possível agora definir o número de Nusselt.

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \times Ra^{\frac{1}{16}}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 58,4.$$

Conhecendo o número de Nusselt, é possível obter o valor do coeficiente de convecção natural através da Equação 5:

$$h = \frac{(Nu \times k)}{L} = 5,11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Agora de posse de todos os valores necessários, pode-se voltar a Equação 11 onde foram relacionadas as equações que definem a taxa de transferência de calor por condução e por convecção, para encontrar o valor da espessura de isolante necessária para o forno.

$$h_c \times A \times (T_{\text{fluido}} - T_{\text{objeto}}) = k \times \frac{A \times (T_{\text{mais quente}} - T_{\text{mais frio}})}{L} = 0,202 \text{ metros.}$$

Conforme Incropera (2011), sabe-se que as equações até agora utilizadas são aplicadas às paredes verticais. Por tanto, se torna necessário verificar, através da Equação 9, se esses cálculos podem também ser utilizados para cilindros verticais.

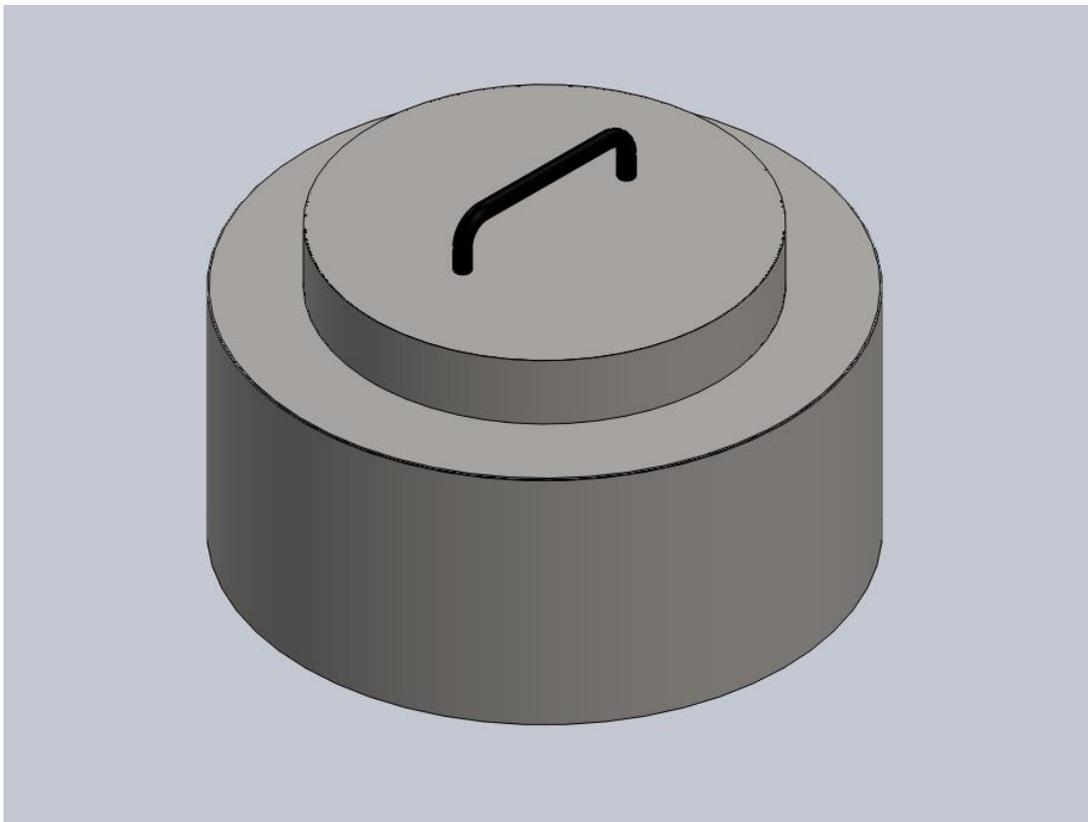
$$\frac{D}{L} \approx \frac{35}{Gr^{1/4}} = 2,75 > 0,33$$

Através da Equação 9, é possível concluir que os cálculos relacionados a paredes verticais, neste caso, também podem ser utilizadas para este cilindro

5 RESULTADOS

Após o dimensionamento e determinação das especificações geométricas do projeto do forno, realizaram-se os desenhos 3D dos elementos construtivos. Para a realização desta atividade, foi utilizado um software em CAD, disponível na instituição. A Figura 8 apresenta uma vista isométrica do projeto do equipamento.

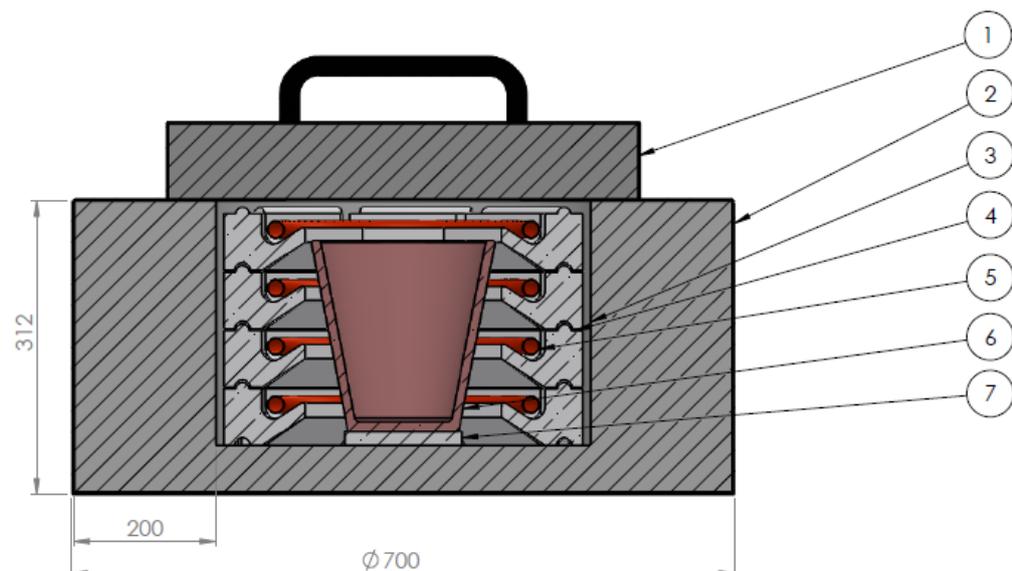
Figura 8 – Vista isométrica do forno



Fonte: Do autor (2016).

Para uma compreensão melhor dos elementos construtivos internos e também das dimensões aplicadas em cada componente, a Figura 9 traz uma vista em corte do projeto, onde é possível observar todos os elementos construtivos, conforme relação com a Tabela 4. Também é possível verificar as dimensões externas, em milímetros, do projeto final, como a dimensão do isolante, que foi anteriormente calculada. Na figura 9 é possível observar a existência de 4 resistências elétricas. Para o forno foi dimensionado que a resistência elétrica deveria possuir a potência de 6000 W. Esse valor foi dividido por igual em quatro partes, para que a dissipação da energia térmica provenientes das resistências elétricas se dê de maneira mais homogênea no interior do forno.

Figura 9 – Vista em corte do projeto



Fonte: Do autor (2016).

Na Tabela 4 é possível verificar a relação dos elementos construtivos do forno conforme a indicação na Figura 9.

Tabela 4 – Relação dos elementos construtivos

Item	Descrição
1	Tampo
2	Extrutura externa
3	Isolante térmico
4	Suporte de resistências elétricas
5	Resistências elétricas
6	Cadinho
7	Suporte para o cadinho

Fonte: Do autor (2016).

Na Figura 9 é possível observar alguns elementos construtivos necessários para o correto funcionamento do equipamento, mas que não foram anteriormente citados, como por exemplo, o suporte para as resistências elétricas e também o suporte do cadinho. Ambos os elementos são necessários para o correto funcionamento do forno, e necessitam suportar altas temperaturas. Conforme citado por Rebernak e Chernack (2010), além das fibras cerâmicas, os materiais refratários são bons isolantes térmicos e também possuem a característica de manter as suas propriedades em altas temperaturas. Para esta aplicação, foi selecionado suporte de resistência que é comercialmente encontrado. Esse suporte, conforme Figura 10, apesar de ser de material refratário, não foi considerado nos cálculos para o isolamento térmico, pois a sua principal função é dar suporte as resistências elétricas.

Figura 10 – Suporte para resistências elétricas



Fonte: Do autor (2016).

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou as principais fases de um projeto de um forno a resistência elétrica com a finalidade de fundição de alumínio e suas ligas, desde a fase conceitual até o dimensionamento dos principais elementos construtivos. Foi possível uma análise e entendimento prático das melhores configurações de todos os principais elementos construtivos que compõem um forno a resistência elétrica.

A literatura consultada fornece subsídios acadêmicos para o dimensionamento dos elementos construtivos, desta maneira sendo possível, através dos cálculos encontrados, definir quais as dimensões necessárias para os principais elementos, como o isolante térmico.

Com base nos dados obtidos, e valores calculados, conclui-se que o projeto alcançou resultados expressivos. Todos os objetivos determinados inicialmente foram alcançados, dos quais o principal objetivo foi a determinação das dimensões necessárias para um forno a resistência elétrica com capacidade de fundição de 7 a 8 Kg de alumínio. Forno este que necessitaria de resistências elétricas com potência total de 6000 W e uma parede de isolante térmico com espessura de 200mm, para garantir uma operação segura aos usuários. Isto só foi possível através da metodologia proposta do capítulo 3, que se demonstrou adequada para atender os objetivos propostos neste trabalho, além de proporcionar uma grande fonte de conhecimento possibilitando que o autor atuasse em todas as fases de um projeto de engenharia mecânica.

REFERÊNCIAS

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

BALDMAN, Roquemar de Lima; VIEIRA, Estéfano Aparecido. **Fundição: processos e tecnologias correlatas**. São Paulo: Saraiva, 2014.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELKY, 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: 20 maio 2016.

CHEMIN, Beatris F. **Manual da Univates para trabalhos acadêmicos: planejamento, elaboração e apresentação**. 3. ed. Lajeado: Univates, 2015.

CHERNACK, Steve. Dicas para revestimento refratário. **Industrial Heating**, p. 63, jan./mar. 2013.

CHERNACK, Steve; REBERNACK, Thomas. Manutenção para eficiência energética. **Industrial Heating**, p. 32, abril, 2010.

HERRING, Daniel H. Transferência de calor. **Industrial Heating**, p. 24, jan./set. 2015.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

KANTHAL HANDBOOK. **Resistance heating alloys and systems for industrial furnaces**. 2001. Disponível em: <<http://www.kanthal.com/>>. Acesso em: 10 maio 2016.

MORGAN ADVANCED MATERIALS. **Matching your crucible to your application**. 2013. Disponível em: <<http://www.morganmms.com/content/matching-your-crucible-your-application>>. Acesso em: 10 maio 2016.

MORGANITE DO BRASIL LTDA. **Manual de fundição a cadinho**. São Bernardo do campo, 2005. Disponível em: <<http://www.morganitebrasil.com.br/empresa.htm>>. Acesso em: 20 maio 2016.

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

RESENDE, Waldir de Sousa. Tipos de refratários: parte III produtos não conformados (monolíticos). **Industrial Heating**, p. 47, out./dez. 2011.

SHEY, J. **Introduction to manufacturing process**. Nova York: McGraw-Hill, 2000.

SILVA, Edna Lúcia de; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. rev. e atual. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2005.

SOARES, G. A. **Fundição: mercado, processos e metalurgia**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2000.

TORRE, Jorge. **Manual prático de fundição e elementos de prevenção da corrosão**. São Paulo: Hemus, 2004.

ANEXOS

ANEXO A - Propriedades termofísicas dos gases a pressão atmosférica

TABLE A.4 Thermophysical Properties
of Gases at Atmospheric Pressure^a

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Air, $M = 28.97$ kg/kmol							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	257	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536

Fonte: Incropera (2011, p. 911).