

Metodologia construtivista: dimensionamento e fabricação de um forno tipo mufla de alto desempenho**Constructivist Methodology: Design and manufacture of a high performance muffle furnace**

DOI:10.34117/bjdv5n11-392

Recebimento dos originais: 25/11/2019

Aceitação para publicação: 02/12/2019

Gabriel Gonçalves Pessoa De Castro

Doutor em Engenharia Metalúrgica

Instituição: Universidade Federal Fluminense (UFF).

Endereço: R. Doze - Vila Santa Cecília, Volta Redonda - RJ, 27255-125.

E-mail: gabriel.pessoa@aedb.br

Gustavo José da Silva Nunes Rezende

Graduando em Engenharia Mecânica pela Associação Educacional Dom Bosco – Escola de Engenharia de Resende (AEDB-FER).

Endereço: Av. Cel. Prof. Antônio Esteves, 1 - Campo de Aviação, Resende - RJ, 27523-000.

E-mail: gustavonunes198@gmail.com

Leonardo Feliciano Maciel

Graduando em Engenharia Mecânica pela Associação Educacional Dom Bosco – Escola de Engenharia de Resende (AEDB-FER).

Endereço: Av. Cel. Prof. Antônio Esteves, 1 - Campo de Aviação, Resende - RJ, 27523-000.

E-mail: leonardo_07.0@hotmail.com

Leon Vitor de Abreu de Almeida

Graduando em Engenharia Mecânica pela Associação Educacional Dom Bosco – Escola de Engenharia de Resende (AEDB-FER).

Endereço: Av. Cel. Prof. Antônio Esteves, 1 - Campo de Aviação, Resende - RJ, 27523-000.

E-mail: leonengmecanica@gmail.com

RESUMO

Os tratamentos térmicos realizados em aços são processos fundamentais para obtenção de propriedades específicas no material, uma vez que para obtê-las o aço é aquecido e resfriado sob condições controladas. Para este processo deve-se utilizar um forno de alta temperatura, chamado forno mufla, que possibilita o controle e monitoramento de temperaturas elevadas, que são necessárias para atingir a temperabilidade de cada material. Tendo em vista o que foi dito anteriormente, o presente trabalho, apresenta os passos para realização do dimensionamento de um forno mufla de baixo custo para tratamento térmico, demonstrando os cálculos necessários para se obter a geometria mais eficiente e materiais mais indicados para a aplicação e o dimensionamento detalhado da espessura das camadas de isolamento térmico e da resistência elétrica, com o intuito de desenvolver um equipamento de alto desempenho, possibilitando estudos científicos e trabalhos acadêmicos nas áreas de termodinâmica e tratamento térmico de materiais.

Palavras-Chave: Forno mufla; dimensionamento; isolamento térmico; resistência elétrica.

ABSTRACT

The heat treatments performed on steels are fundamental processes to obtain specific properties in the material, since to obtain them the steel is heated and cooled under controlled conditions. For this process a high temperature furnace, called muffle furnace, must be used, which enables the control and monitoring of high temperatures, which are necessary to achieve the temperability of each material. In view of the above, the present work presents the steps for the design of a low cost muffle furnace for heat treatment, demonstrating the calculations necessary to obtain the most efficient geometry and materials best suited for the application and the detailed sizing of the thickness of the thermal insulation layers and the electrical resistance, in order to develop a high performance equipment, enabling scientific studies and academic work in the areas of thermodynamics and heat treatment of materials.

Key-words: Muffle oven; sizing; thermal insulation; electrical resistance.

1 INTRODUÇÃO

Na engenharia, o estudo dos materiais se mostra de grande importância, uma vez que eles formarão o corpo de máquinas, equipamentos e ferramentas. Entretanto esses materiais, na maioria dos casos, não são encontrados em sua forma ideal na natureza, quanto às propriedades físicas, mecânicas e químicas, salientando assim, a necessidade de compreensão da manipulação micro estrutural dos mesmos, através de tratamentos térmicos [1]. A fim de estudar essas mudanças nas propriedades, almeja-se por meio desse o dimensionamento de um forno mufla, seguindo parâmetros estabelecidos pelas normas vigentes, visando à regulamentação do mesmo, promovendo assim à universidade a possibilidade de abordar uma infinidade de temas, trabalhos e projetos de pesquisa, favorecendo a formação dos discentes, além de possibilitar uma vivência científica aos alunos.

Diversas atividades realizadas em laboratórios são de extrema importância para o contínuo desenvolvimento científico e acadêmico, assim, para que ocorra esta constante evolução, muitos são os equipamentos considerados imprescindíveis em um complexo laboratorial, tal como o forno mufla.

O emprego desse tipo de forno traz diversas vantagens, como a realização de tratamentos térmicos, uma vez que o forno de resistência elétrica permite um controle térmico de extrema precisão, bem como um processo mais limpo, evitando a contaminação das amostras, por conta de corpos estranhos que possam vir a comprometer o corpo de prova. Além disso, a instalação de um forno elétrico não demanda um grande espaço físico. Os fornos tipo mufla também possuem a vantagem de serem relativamente fáceis de operar e controlar, dispensando a necessidade de vasta experiência de operação, diferente de outros tipos de fornos [2].

Nesses fornos, as resistências elétricas são dispostas de maneira que a corrente elétrica passe por elas as aquecendo, gerando assim calor, que é irradiado por toda a extensão do volume interno, aquecendo uniformemente o interior do forno [3].

O forno oferece também outras vantagens como o estudo de termodinâmica e transmissão de calor, sendo possível gerar gradientes de aquecimento, bem como curvas de aquecimento e resfriamento dos corpos de prova, proporcionando assim, uma ampla gama de estudos, que vai desde o tratamento térmico e análise micro estrutural até o estudo de fenômenos de transporte através de condução, radiação e convecção.

Dito isso, ao final do trabalho, terá sido realizado o dimensionamento aprofundado do forno, desde a geometria mais eficiente, bem como os materiais mais indicados para a aplicação de tratamentos térmicos à temperatura máxima de 1200°C, até o dimensionamento detalhado da espessura das camadas de isolamento, a resistência elétrica e os componentes eletrônicos, com o intuito de desenvolver um equipamento de alto desempenho, para ser aplicado a estudos científicos, projetos de pesquisa e trabalhos acadêmicos nas áreas de termodinâmica, transmissão de calor e tratamento térmico de materiais metálicos e não metálicos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo possui em seu conteúdo as teorias bases nas quais as análises desenvolvidas nesse artigo estão fundamentadas e descreve as equações chave que permitiram a obtenção dos resultados que serão mostrados adiante.

2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Incropera (2011) define a transferência de calor como energia térmica em trânsito devido a um diferencial de temperaturas^[4]. Segundo Herring (2015) a alteração de temperatura, ou seja, o resfriamento e aquecimento de uma peça ocorre mediante três diferentes modos, sendo eles a condução, a convecção e a radiação ^[5].

2.1.1 Condução

De acordo com Herring (2015) a condução acontece quando há um contato entre objetos com diferentes temperaturas. Sendo que após este contato o calor irá fluir do corpo com maior temperatura para o de menor temperatura, até que haja um equilíbrio e ambos estejam com a mesma temperatura ^[5]. Segundo Burger et al. (2016), os mecanismos de condução térmica dos sólidos se tornam complexos devido aos diversos parâmetros que devem ser levados em consideração, como a natureza do material, tamanho e proporções que são características importantes, pois quanto mais espesso o material, mais tempo o calor levará para atingir a face oposta ^[6].

De acordo com Herring (2015), a equação que determina a transferência de calor por condução é ^[5]:

$$Q = \frac{K \times A \times (T_Q - T_F)}{L}$$

(1)

Onde:

Q é o calor (w)

k é a condutividade térmica (W/m.K)

A é a área (m²)

$T_Q - T_F$ é a diferença de temperatura (K)

L é a espessura (m).

2.1.2 Convecção

Segundo Incropera (2011), a convecção ocorre quando há contato entre um fluido em movimento e uma superfície. Podendo ocorrer mediante dois mecanismos, o movimento molecular aleatório e o movimento global. Sendo que este movimento está relacionado ao momento em que um conjunto de moléculas se move coletivamente, e tal movimento juntamente a um gradiente de temperatura, irá favorecer a transferência de calor ^[4].

Segundo Herring (2015), a equação que calcula a taxa de transferência por convecção é dada por ^[5]:

$$Q = h_c \times A \times (T_f - T_o)$$

(2)

Onde:

Q é o calor (w)

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

A é a área da superfície (m²)

$T_f - T_o$ é a diferença entre a temperatura do fluido e a do objeto em contato (K)

2.1.3 Convecção Natural

Incropera (2011) afirma que a convecção natural é a transferência de calor que surge quando o movimento do fluido é gerado por empuxo causados pelas diferenças de densidade, gerada por variações de temperaturas no fluido ^[4].

Incropera (2011) ainda afirma que para determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção natural, deve -se utilizar a equação 3 ^[4]:

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

(3)

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)

Incropera (2011) define o número de Nusselt como um valor que relaciona a transferência de calor por convecção e condução de um fluido, podendo ser calculado por meio da equação 4 [4].

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

(4)

Sendo, *Nu* o número de Nusselt, *Pr* o número de Prandtl e *Ra* o número de Rayleigh.

Incropera (2011) afirma que o número de Rayleigh é a relação entre o número de Grashof e o número de Prandtl, dado por [4]:

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

(5)

Onde:

Ra é o número de Rayleigh*Gr* é o número de Grashof*Pr* é o número de Prandtl*g* é gravidade (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)

α é a Difusividade térmica (m²/s).

Incropera (2011) também define o número de Grashof como o número que relaciona as forças de empuxo com a viscosidade em um fluido. Podendo ser calculado pela seguinte equação [4]:

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

(6)

Onde:

Gr é o número de Grashof (adimensional)

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)

2.1.4 Radiação

A radiação é a forma de transferência de calor no qual não há contato entre a fonte de calor e o objeto a ser aquecido. Sendo que esta transferência causada por radiação é capaz de ocorrer em qualquer circunstância, porém se torna mais eficiente com o aumento da temperatura, portanto, deve-se projetar de forma cuidadosa os isolamentos de fornos [5].

Herring (2015) também diz que a taxa de calor transferida por radiação é obtida pela equação [5]:

$$Q = A \times \sigma \times F_e \times F_s \times (T_{ra}^4 - T_{re}^4)$$

(7)

Onde:

Q é o calor transferido (w),

A é a área da superfície (m²),

σ é uma constante (Stefan-Boltzmann),

F_e e F_s são as emissividades,

T é a temperatura (K).

3 MATERIAIS

3.1 MECÂNICA ESTRUTURAL

- Estrutura

Toda a estrutura do forno será fabricada utilizando como material chapa preta de aço SAE 1045, a chapa é fornecida com uma dimensão de 2000x1200 com 2,65mm de espessura. O aço SAE 1045 possui um coeficiente de condução térmica (k) de 50,2 W/m.K, calor específico (cp) de 502 J/Kg.°C, massa específica (ρ) de 7860 Kg/m³.

- Isolamento Térmico

O isolamento térmico contará com 3 materiais isolantes:

- Placa de fibra cerâmica com massa específica 300Kg/m³ e coeficiente de condutividade térmica de $K=0,179$ W/m.K;
- Manta de fibra cerâmica com massa específica de 128 Kg/m³ e coeficiente de condutividade térmica de $K=0,179$ W/m.K;
- Concreto Isolante CHS-1515, possui coeficiente de condutividade térmica de $K=0,570$ W/m.K.

3.2 COMPONENTES ELÉTRICOS

- Resistência Elétrica

O material da resistência elétrica será o Kanthal D, é fornecido por quilo na forma de rolos e possui uma grande gama de diferentes diâmetros. Sua temperatura de trabalho é 1300°C e possui Resistividade Elétrica de 1,35 Ω .mm²/m e fator correção por temperatura de 1,04 para 1200°C.

- Painel de controle:

O painel conta com um kit controlador de temperatura, com o auxílio de um relé térmico e um termopar. Foram utilizadas também botoeiras para ligar e desligar o sistema, um disjuntor de 30a, bem como 6 m de cabos de 6mm², como pode ser visto na figura 1, que corresponde ao esquema elétrico do forno.

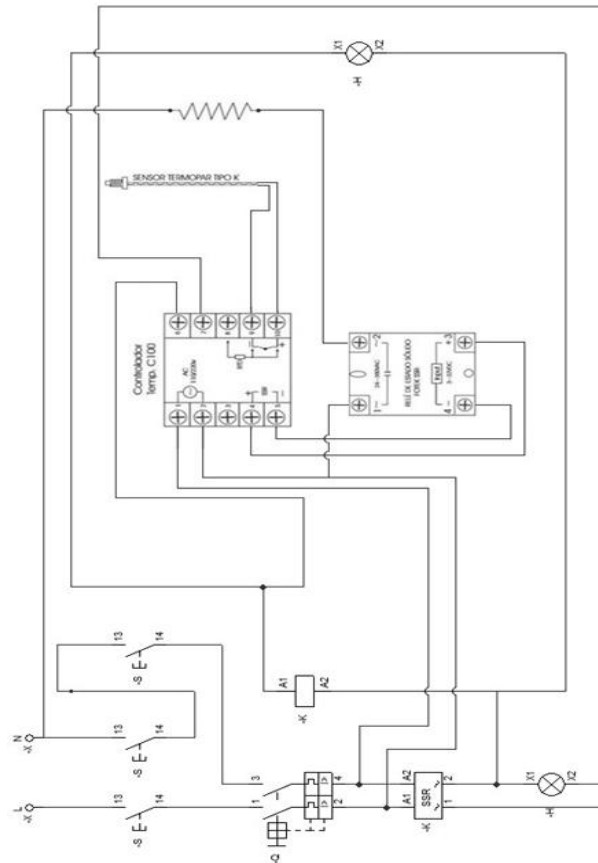


Figura 1: Esquema elétrico do Forno.

4 MÉTODO

4.1 CÁLCULOS DE DIMENSIONAMENTO

Após a análise literária, foi visto que, alguns dados de entrada devem ser determinados para iniciar o dimensionamento do forno, como a temperatura máxima obtida no interior e exterior, além dos materiais a serem utilizados.

O forno irá alcançar a temperatura de 1200°C em seu interior, enquanto a parte externa irá aquecer até no máximo 80°C, sendo que a temperatura ambiente do laboratório será em média 21,8°C.

Para que a temperatura interna seja mantida e a externa não exceda o esperado, é necessário a utilização de materiais isolantes na estrutura. Neste forno será utilizado placas de fibra isolante, manta de fibra isolante e cimento isolante, além de uma camada de ar entre a estrutura interna e externa. Os dados de entrada e constantes necessárias para resolução dos cálculos estão dispostos na tabela 1 abaixo. Sendo que algumas destas constantes foram determinadas através de interpolação em tabelas de dados da literatura.

Tabela 1: Dados de entrada dos isolantes.

DADOS DE ENTRADAS		
K_{Manta}	Condutividade Térmica do Isolante (W/m.K)	0,179
ρ_{Manta}	Densidade da Manta de Fibra Cerâmica (Kg/m ³)	128
P	Profundidade interna (m)	0,200
H	Altura interna (m)	0,090
C	Comprimento interno (m)	0,130
$L_{aço}$	Espessura chapa interna e externa - aço SAE 1020 (mm)	2,6
L_{ar}	Espessura Camada de ar (mm)	50,000
$L_{concreto}$	Espessura Camada de Concreto Isolante da Soleira (mm)	70,000
$K_{aço}$	Condutividade Térmica da chapa externa de aço (W/m.K)	50,200
$K_{concreto}$	Condutividade Térmica do Concreto Isolante CHS-1515 (W/m.K)	0,570
β_{ar}	Coefficiente de dilatação térmica do ar (1/K)	3,67E-03
g	Aceleração da Gravidade (m/s ²)	9,810
ν_{ar}	Viscosidade cinemática do ar à Ta (m ² /s)	1,54E-05
α_{ar}	Difusividade térmica à Ta (m ² /s)	2,18E-05
K_{ar}	Condutividade Térmica do ar à Ta (W/m.K)	0,026
Pr_{ar}	Número de Prandtl à Ta (Constante)	0,708

Após estabelecer os dados iniciais, inicia-se os cálculos de dimensionamento do isolamento térmico do forno. Primeiro calcula-se as áreas das placas internas, em seguida é determinado os comprimentos característicos das geometrias do forno juntamente aos números de Grashof, Rayleigh e Nusselt, utilizando as equações mostradas acima. Após obter os resultados dos cálculos anteriores, é possível determinar os coeficientes de transferência de calor por convecção natural e enfim determinar as espessuras das camadas isolantes.

Os resultados obtidos, foram listados na tabela 2 abaixo:

Tabela 2: Cálculos de espessura do isolamento térmico.

CÁLCULOS DE ESPESSURA DO ISOLAMENTO TÉRMICO		
L_{CL}	Comprimento Característico da Geometria Lateral (m)	0,090
L_{CF_T}	Comprimento Característico da Geometria Frontal/Traseira (m)	0,090
L_{CS_I}	Comprimento Característico da Geometria Superior/Inferior (m)	0,039
Gr_L	Número de Grashof para placa Lateral (Constante)	6,41E+06
Gr_{P_T}	Número de Grashof para placa Porta/Traseira (Constante)	6,41E+06
Gr_{S_I}	Número de Grashof para placa Superior/Inferior (Constante)	5,37E+05
Ra_L	Número de Rayleigh para placa Lateral (Constante)	4,54E+06
Ra_{P_T}	Número de Rayleigh para placa Porta/Traseira (Constante)	4,54E+06
Ra_{S_I}	Número de Rayleigh para placa Superior/Inferior (Constante)	3,81E+05
Nu_L	Número de Nusselt para placa Lateral (Constante)	24,986
Nu_{P_T}	Número de Nusselt para placa Porta/Traseira (Constante)	24,986
Nu_{S_I}	Número de Nusselt para placa Superior/Inferior (Constante)	12,861
he_L	Coef. Transferência de calor - convecção natural Lateral (W/m.K)	7,189
he_{P_T}	Coef. Transferência de calor - convecção natural Frontal/Traseira (W/m.K)	7,189
he_{S_I}	Coef. Transferência de calor - convecção natural Superior/Inferior (W/m.K)	8,454
L_L	Espessura da Camada de Isolante - Lateral (mm)	134
L_{P_T}	Espessura da Camada de Isolante - Porta / Traseira (mm)	134
L_S	Espessura da Camada de Isolante - Superior (mm)	62
L_I	Espessura da Camada de Isolante - Inferior (mm)	40

Após o cálculo dos isolamentos térmicos, é necessário realizar os cálculos de dimensionamento das resistências elétricas do forno. Assim como nos isolamentos, para realizar o dimensionamento das resistências, primeiro é necessário definir alguns dados de entrada como a voltagem de alimentação, a porcentagem de volume útil do forno, o diâmetro do arame e as constantes do material utilizado como resistência. Estes dados são mostrados na tabela 3:

Tabela 3: Dados de entrada da resistência elétrica

DADOS DE ENTRADAS		
V	Voltagem de Alimentação do forno (Volts)	220
%V	% do Volume usado do forno	15
d	Diâmetro do Arame de Kanthal D (mm)	2,052
D	Diâmetro interno da Espira (mm)	7,5
C _{aço}	Calor específico do Aço (J/Kg°C)	502
ρ _{aço}	Peso específico do Aço (Kg/m ³)	7860
ρ	Resistividade Elétrica (Ω.mm ² /m)	1,35
C _t	Fator de Temperatura (Constante)	1,04

Após determinar os valores de entrada, iniciam-se os cálculos. Primeiro calcula-se o volume útil, em seguida é calculado a massa de aço a partir do volume e a quantidade de calor necessária para aquecer o volume preenchido de aço. A potência foi calculada para aquecer 3,68 Kg em cinco minutos. Logo após é determinado a corrente elétrica, a resistência por metro de arame, a resistência total a temperatura máxima e à ambiente. Após determinar as resistências é possível determinar o comprimento total do arame. E por fim é calculado o comprimento total da bobina e a carga de superfície. Os resultados estão listados na tabela 4 abaixo:

Tabela 4: Cálculos do dimensionamento da resistência.

CÁLCULOS DO DIMENSIONAMENTO DA RESISTÊNCIA		
V _{útil}	Volume útil do forno - 15% (m ³)	3,51E-04
M _{aço}	Massa de aço no volume útil (Kg)	2,759
Q	Quantidade de Calor para aquecer o volume preenchido de aço (J)	1,63E+06
P	Potência necessária para aquecer 3,68 Kg em 5 min de aço (W)	5,44E+03
I	Corrente elétrica Total (A)	25
Ω/m	Resistência por metro de Arame (Ω/m)	0,408
R _{T₁}	Resistência Total a Temperatura Máxima (Ω)	8,898
R _{T₂}	Resistência Total a Temperatura Ambiente (Ω)	8,56
L	Comprimento total de Arame (m)	20,9
x	Comprimento total da Bobina (mm)	1433
S	Carga de Superfície (W/cm ²)	4,02

4.2 DIMENSIONAMENTO

A estrutura externa do forno foi construída com uma chapa de aço SAE 1020. Foi utilizada uma chapa inteiriça de 1880 mm x 410 mm, que foi dobrada para formar a estrutura retangular, como visto na figura 2, para posteriormente serem feitos os rasgos, facilitando a circulação da camada interna de ar do forno.

O interior do forno foi projetado com altura, comprimento e profundidade de 90 mm, 130 mm e 200 mm, respectivamente, como mostrado na figura 3. A escolha do volume interno se deu à sua aplicação e a facilidade da transmissão de calor e homogeneização térmica para essas dimensões. Tendo em vista que ele será empregado basicamente para ensaios, utilizando corpos de provas, com propósitos acadêmicos e científicos, foi decidido que esse volume era suficiente.



Figura 2: Estrutura externa.

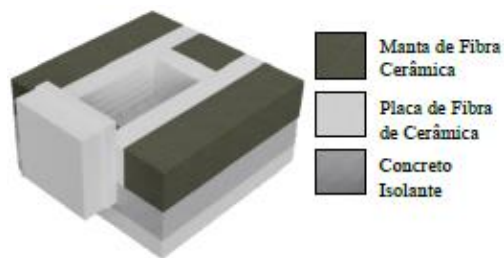


Figura 3: Volume interno.

Com relação ao isolamento térmico, na parte superior foram utilizadas uma camada de placa de fibra isolante de 50 mm e uma de manta de fibra cerâmica, também de 50 mm (figura 4). Já a parte inferior é composta de uma camada de concreto isolante de 70 mm e uma camada de placa de fibra isolante, de 50 mm (figura 5).

Nas laterais foram aplicadas uma camada de placa de fibra isolante de 50 mm e uma de manta de fibra cerâmica de 100 mm. A parte de trás do forno possui uma placa de fibra isolante de 50 mm e uma de manta de fibra cerâmica, de 100 mm (figura 3).

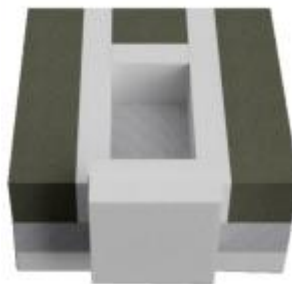


Figura 4: Isolamento lateral.

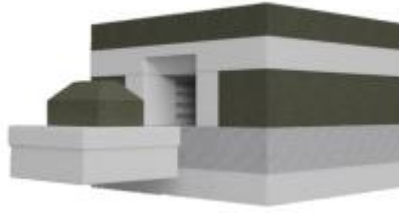


Figura 5: Isolamento térmico superior e inferior.

O isolamento térmico na porta do forno foi feito por meio de duas camadas, uma de fibra isolante de 80 mm, 50 mm na parte externa e 30 mm na parte interna, e uma de manta de fibra cerâmica de 70 mm. Para que a porta do forno abrisse e fechasse normalmente, foi necessário um chanfro na parte superior da manta de fibra cerâmica da porta e na fibra isolante na parte superior do isolamento interno do forno (figura 7).

Todos os componentes isolantes no interior do forno foram construídos de forma que se encaixem uns nos outros, mantendo a rigidez da estrutura dispensando a necessidade da fixação dos mesmos, isso combinado ao fato da tampa traseira ser removível irá facilitar drasticamente manutenções futuras (figura 6).



Figura 6: Estrutura interna.

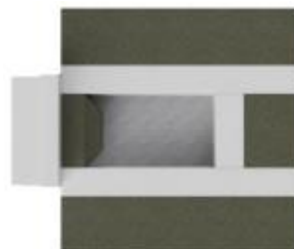


Figura 7: Isolamento térmico traseiro e da porta.

Para garantir que a temperatura na película externa se mantivesse em até 80°C, a estrutura do forno foi construída em duas partes, com uma camada de ar de 50 mm de espessura separando as mesmas,

minimizando assim a transmissão de calor entre a parte interna para a externa. O ar foi escolhido para preencher essa camada devido ao fato de ter grande poder isolante, sendo ideal para reduzir drasticamente a transmissão de calor entre a parte interna e a externa do forno. A ligação entre essas duas partes foi feita por meio de cantoneiras, com a menor superfície de contato possível, para reduzir a transmissão de calor por condução (figura 9).

Para a disposição do sistema elétrico, foi anexado um painel elétrico na lateral do forno, nele foi fixado o kit controlador de temperatura com relé e termopar, as botoeiras para ligar/desligar o sistema e o disjuntor. O termopar foi introduzido no interior do forno através de um furo na parte traseira do mesmo, passando pelo centro do isolamento térmico.

Com relação às resistências elétricas, foram feitos rasgos nas placas de fibra isolante nas laterais do forno, nas quais foram fixadas as resistências (figura 8).

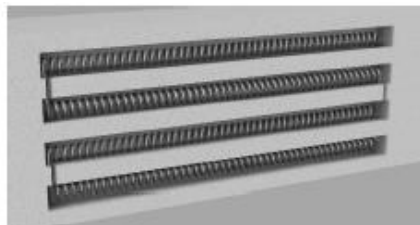


Figura 8: Resistência Elétrica.

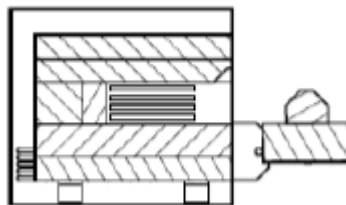


Figura 9: Vista de corte lateral do forno.

5. RESULTADO E DISCUSSÃO

A primeira etapa no processo de construção do forno foi a projeção 2D e 3D, feita com o auxílio de um software, que além de possibilitar o desenho do projeto foi capaz de realizar a simulação do funcionamento dos componentes mecânicos (figura 10).



Figura 10: Forno completo.

A montagem propriamente dita começou pela estrutura externa, com a dobradura da chapa de aço SAE 1020. Para que as medidas projetadas fossem atingidas (Figura 11), a dimensão da chapa dobrada foi ligeiramente maior do que a de projeto, evitando assim erros no resultado final. A estrutura interna do forno foi construída com o mesmo material e método da estrutura externa. Com relação às tampas frontal e traseira, foram recortadas chapas de mesma dimensão, porém na tampa frontal, foi feito um furo para a porta.

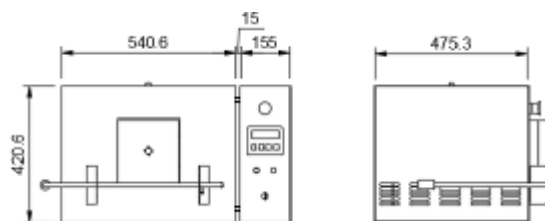


Figura 11: Dimensões do forno.

Após a confecção da estrutura interna do forno, foi preparado o sistema de isolamento térmico. Para o concreto refratário, foram feitos moldes com as dimensões especificadas no projeto, obtendo assim, a geometria necessária. A manta de fibra cerâmica foi colada em camadas até que atingisse a espessura de projeto. E por último, a placa de fibra isolante, que foi recortada baseada nas dimensões pré-estabelecidas. Antes que fossem fixadas as placas do isolamento, foram feitos os rasgos para passar as resistências elétricas, o furo para a instalação do termopar e os chanfros necessários para que fosse possível abrir e fechar o forno, sem o travamento da porta.

Para a finalização da parte mecânica, a parte externa foi conectada a parte interna, utilizando colunas de aço, duas para cada lado do forno.

Com a finalização do dimensionamento do projeto, pôde ser constatada a viabilidade da construção do forno, tendo em vista que o preço total do projeto é de R\$3.013,15, e os preços desse tipo de forno, no mercado atual, variam entre R\$3.500,00 e R\$5.000,00 para esse mesmo volume, ou aproximado. Além da viabilidade financeira, o projeto se mostrou de grande valor acadêmico, uma vez que foi necessária a revisão detalhada da literatura, reforçando assim, os conceitos de termodinâmica, bem como o aprendizado quanto ao uso de ferramentas de desenvolvimento de projeto, como o PMBOK.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou as principais etapas do dimensionamento de um forno tipo mufla aquecido por resistência elétrica, com a finalidade de realizar tratamentos térmicos em ligas metálicas e não metálicas, com a capacidade de atingir até 1200°C com uma variação de até $\pm 2^\circ\text{C}$. Foi possível um estudo aprofundado da literatura e entendimento teórico do melhor método e configuração dos principais elementos construtivos necessários para a confecção desse tipo de forno.

Durante a revisão da literatura foi possível estabelecer os parâmetros a serem calculados, com relação à termodinâmica envolvida, bem como a melhor forma de posicionar os elementos isolantes.

Ao final da atividade, conclui-se que o projeto obteve resultados satisfatórios, uma vez que todos os objetivos iniciais foram realizados, sendo o principal deles, o dimensionamento dos parâmetros necessários para a construção do forno, desde os cálculos direcionados a transmissão de calor e parâmetros elétricos do forno, até a projeção da estrutura mecânica propriamente dita, chegando assim, a um produto final satisfatório para a finalidade para a qual foi projetado.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento a Universidade Dom Bosco – Faculdade de Engenharia de Resende (AEDB-FER), pelo incentivo a pesquisa e apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] COLPAERT, H., 2008, “Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns”, Editora Edgard Blücher Ltda, 4ª Edição, São Paulo.
- [2] TORRE, JORGE. Manual prático de fundição e elementos de prevenção da corrosão. São Paulo: Hemus, 2004.
- [3] BALDMAN, Roquemar de Lima; VIEIRA, Estéfano Aparecido. Fundição: processos e tecnologias correlatas. São Paulo: Saraiva, 2014.
- [4] INCROPERA, FRANK P. et al. Fundamentos de transferência de calor e massa. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- [5] HERRING, DANIEL H. Transferência de calor. Industrial Heating, p. 24, jan./set. 2015.

[6] BURGER, N. et al. Review of thermal conductivity in composites: mechanisms, parameters and theory. *Progress in Polymer Science*, v. 61, p. 1-28, 2016.