

Projeto e desenvolvimento de um forno elétrico resistivo para aulas de tratamento térmico

REDIVO ISRAEL, Matheus
Engenharia Mecatrônica
Instituto Federal de Santa Catarina
Criciúma, Santa Catarina, Brasil
matheus.ri@aluno.ifsc.edu.br

MICHELON MARQUES, Fernando
Engenharia Mecatrônica
Instituto Federal de Santa Catarina
Criciúma, Santa Catarina, Brasil
fernando.marques@ifsc.edu.br

Resumo — O aço é a liga do sistema Ferro-Carbono com a maior abrangência de aplicações no segmento industrial, sendo essa variedade associada à obtenção de diferentes microestruturas por meio de tratamentos térmicos, nos quais o material é aquecido e resfriado sob condições controladas. Para esse processo, faz-se necessário o uso de um forno de alta temperatura, no caso desse projeto, do tipo elétrico resistivo. Destarte, são apresentados os passos para a realização do dimensionamento desse equipamento, definindo os materiais da estrutura, as espessuras dos diferentes materiais isolantes térmicos, bem como o dimensionamento das resistências elétricas. Primeiramente, foram definidos parâmetros iniciais, como a temperatura de trabalho (800°C), temperatura externa da superfície (70°C), volume interno útil (27 L) e rampa de aquecimento (7°C/min). Em posse desses, e outros dados, tornou-se possível estabelecer o balanço de energia do sistema, viabilizando determinar a espessura dos isolantes térmicos. Definida a potência do forno e o diâmetro do fio resistivo, foi determinado o comprimento da resistência, diâmetro e passo do enrolamento. Ademais, com os projetos mecânico e elétrico, foi realizada a produção do equipamento, utilizando-se do espaço e ferramentas do IFSC campus Criciúma. Por fim, foram efetuados ciclos de aquecimento e resfriamento, bem como a avaliação da temperatura das superfícies externas, onde os resultados se mostraram condizentes com o projeto, apesar de duas temperaturas superficiais terem ultrapassado o limite estabelecido, contudo, não afetando no funcionamento do equipamento.

Palavras-chave — Forno elétrico. Resistência elétrica. Isolamento térmico. Dimensionamento.

I. INTRODUÇÃO

Componentes metálicos são utilizados em diversos setores da indústria, sendo fabricados principalmente com ligas à base de ferro, alumínio, cobre e níquel. Por serem utilizados em aplicações específicas e exigirem bom desempenho, esses componentes necessitam de propriedades que atendam tais demandas [1].

As ligas à base de ferro são as de maior importância e aplicação industrial, possuindo o carbono como o elemento de liga principal, formando o sistema Fe-C (ferro-carbono), que permite a obtenção de microestruturas variadas. Ainda, tem-se o aço como a liga desse sistema com a maior abrangência dentro do segmento da indústria, sendo essa variedade associada à obtenção de diferentes microestruturas após ciclos térmicos específicos de aquecimento e resfriamento, ou seja, tratamentos térmicos [1].

Ligas de aço com alto teor de carbono apresentam uma melhora significativa em suas propriedades quando submetidas a um tratamento térmico [2]. Esse procedimento combina operações de aquecimento e resfriamento, sendo aplicadas em determinado período de tempo aos metais e suas

ligas no estado sólido, em busca de propriedades específicas. Alguns dos objetivos desse processo são: remoção de tensões internas, aumento da dureza, da resistência ao desgaste e à tração, da ductilidade e da usinabilidade, além da melhora das propriedades de corte e da resistência ao calor e à corrosão [3]. Em aços, os principais tipos de tratamento térmico são: têmpera, normalização, recozimento e revenimento, onde nos dois primeiros processos o aço é aquecido em temperaturas acima da zona crítica, ou seja, entre 750 e 950°C. Entretanto, os dois últimos processos trabalham abaixo da zona crítica, onde no recozimento as temperaturas variam entre 570 e 670°C, e no revenimento entre 100 e 700°C [1, 4, 5].

Apesar do conhecimento acerca das propriedades dos materiais e dos processos de trabalho, faz-se necessário o uso de equipamentos adequados para um bom tratamento térmico. Esses equipamentos são encontrados em laboratórios, oficinas e instalações industriais e, suas fontes de aquecimentos advêm do óleo, gás ou da energia elétrica, sendo esta última o foco deste trabalho. Sendo assim, o aquecimento por resistências elétricas proporciona maior flexibilidade, estabilidade e gradiente de temperatura reduzido entre o interior do forno e a peça se comparado aos restantes [6, 7].

Para que o sistema de aquecimento seja eficiente, mantenha a temperatura interna e não ultrapasse o valor estabelecido para a temperatura externa, são necessários o uso de elementos isolantes, e de qualidade, na construção do equipamento. Nesse sentido, destacam-se as mantas isolantes e o concreto refratário, além do próprio ar, como os principais materiais para essa função [6]. Ademais, as cerâmicas refratárias são muito utilizadas na indústria pela sua capacidade de longos períodos de trabalho sob temperaturas elevadas, sem perderem sua capacidade de isolamento térmico [6].

Na literatura, é possível encontrar uma gama de projetos que objetivam o desenvolvimento de um forno elétrico resistivo para tratamento térmico, ou até mesmo para fundição de aços.

No projeto de Debaco [6], visando o tratamento térmico em aços, é desenvolvido um forno do tipo mufla, fazendo uso de resistências elétricas como fonte de calor. A temperatura interna é mensurada e controlada por um termopar e um microcontrolador com sistema eletrônico de tecnologia PID, respectivamente. Fornos desse tipo costumam ser horizontais, mantendo as peças em contato direto com o equipamento. Entretanto, esse projeto em específico busca elaborar um sistema vertical, no qual os componentes a serem aquecidos fiquem suspensos, de forma a aumentar a homogeneidade da temperatura em toda a extensão do material.

Em contrapartida, o projeto de Santana [9] visa o dimensionamento e construção de um forno elétrico resistivo

do tipo convencional, ou seja, horizontal. E em consonância com o projeto anterior, há também o dimensionamento dos isolamentos térmicos, bem como das resistências elétricas e estrutura mecânica, salvo pelas especificidades de cada um. Contudo, alguns materiais são de preferência técnica e econômica na construção desse tipo de equipamento. Assim como nos projetos anteriores, o desenvolvido por Clementino *et al.* [8] faz uso de aço ABNT 1020, concreto refratário, manta de fibra cerâmica e fio Kanthal® para a confecção da resistência elétrica.

Tomando-se como base os conceitos apresentados anteriormente, este trabalho visa desenvolver um forno elétrico resistivo que fique alocado no IFSC campus Criciúma, com o intuito de contribuir com a infraestrutura dos cursos que necessitam do equipamento e agregar no aprendizado dos discentes envolvidos. Pois, seja no ensino profissionalizante, técnico ou superior relacionado à área de controle ou de processos industriais, há uma demanda por estruturas laboratoriais, instrumentos de medição, bancadas didáticas, equipamentos e acessórios diversos para mediar e facilitar a transmissão do conhecimento de conteúdos específicos. Outrossim, sob um cenário educacional onde observa-se cada vez menos interesse e motivação dos estudantes, todo instrumento que promova dinamização, interesse e estímulo ao aprendizado se torna fundamental para o sucesso do processo de ensino-aprendizagem. Nesse sentido, este projeto se justifica como um importante elemento ao disseminar os benefícios da utilização de instrumentos didáticos no desempenho da educação profissional e tecnológica [10].

Esse artigo está estruturado da seguinte maneira: a seção II apresenta a metodologia usada para o dimensionamento térmico e elétrico do forno, a seção III apresenta os resultados obtidos após a construção do equipamento e testes realizados e, por fim, na seção IV serão apresentadas as considerações finais do projeto.

II. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do projeto proposto foi elaborado um fluxograma, apresentado na Fig.1, contendo os passos a serem seguidos, partindo da revisão bibliográfica e finalizando com a análise dos resultados obtidos.

A. Parâmetros iniciais

Para dar início ao dimensionamento do equipamento, alguns parâmetros iniciais precisam ser definidos para direcionar os cálculos das próximas etapas. A Tabela I apresenta esses parâmetros.

TABELA I. PARÂMETROS INICIAIS

Parâmetros iniciais	
Temperatura máxima de trabalho	800°C
Volume interno útil	27 litros (300 x 300 x 300 mm)
Tensão de alimentação	220 V

B. Dimensionamento elétrico

Inicialmente, estabelece-se a potência do forno, sendo esse valor dependente do material a ser trabalhado, bem como do tempo que se deseja alcançar a condição de operação, como apresenta a equação 1. Para materiais metálicos, há uma tabela, presente no Anexo A, que sinaliza a energia, em kWh/t (quilowatts hora por tonelada), que deve ser fornecida para que a temperatura seja elevada ao valor desejado [11]. Neste caso, foi utilizado o valor para elevar o aço à temperatura de 800°C.

$$P_f = \frac{E \times m}{\eta \times t} \quad (1)$$

Onde, P_f corresponde à potência do forno (kW), E à energia consumida no processo (kWh/t), m à massa do material (t), η ao rendimento do forno (entre 0,6 e 0,8, segundo recomendação da literatura) e t (h) ao tempo desejado para o material atingir a temperatura desejada [11]. Sendo assim, a Tabela II apresenta os valores para cada componente referente ao cálculo da potência do equipamento.

TABELA II. DADOS PARA DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA DO FORNO

Dados para cálculo da potência	
E	160 kWh/t
m	0,063 t
η	0,7
t	2 h

A partir da equação 1 e dos dados da Tabela II, é possível determinar a potência do forno. Em posse dos valores de potência e tensão, utiliza-se a Lei de Ohm para obter o valor da corrente e resistência elétrica do circuito [12]. Entretanto, precisa-se corrigir o valor da resistência elétrica devido ao efeito da temperatura, fazendo uso do fator de correção C_t correspondente à T_{trab} , conforme descreve a equação 2 [13]. Os fatores de correção são apresentados na Fig.2.

$$C_t = \frac{R}{R_{20}} \quad (2)$$

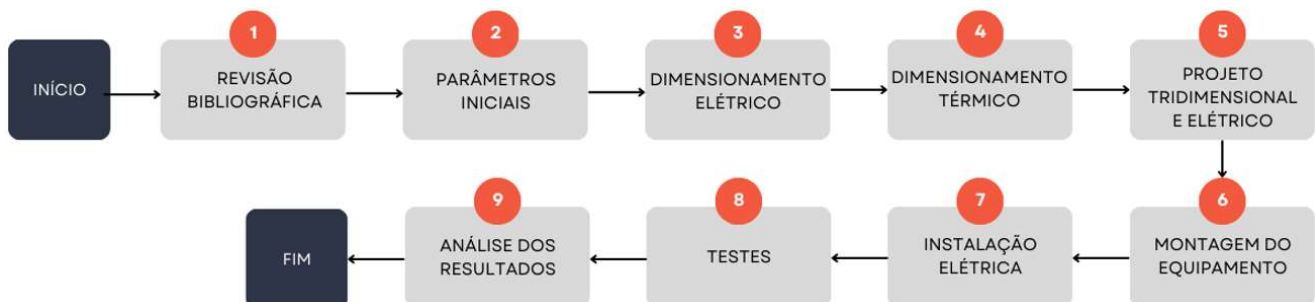


Fig.1 Metodologia.

Temp.(°C)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
Temp.(°F)	212	392	572	752	932	1112	1292	1472	1652	1832	2012	2192	2372	2552
Ct	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

Fig.2 Fator de temperatura da resistividade.

Para resistências elétricas alocadas em ranhuras, o elemento de referência nos documentos é a curva “d” (azul), sendo definido o diâmetro do fio em, no mínimo, 3 milímetros (valor adotado no projeto) [13].

O comprimento L_r de cada resistência é obtido pela equação 3, onde $R_{\Omega/m}$ representa a resistência por metro, equivalendo a 0,205 (Ω/m), como apresentado no Anexo B [13].

$$L_r = \frac{R_{20}}{R_{\Omega/m}} \quad (3)$$

Com os dados obtidos até então, verifica-se se a carga superficial $\rho_{superficial}$ ultrapassa ou não o valor recomendado, apresentado na Fig.3 [13]. A averiguação é realizada a partir da equação 4, onde, A_c representa a área da superfície (cm^2) e I a corrente (A).

$$\frac{A_c}{R_{20}} = \frac{I^2 \cdot C_t}{\rho_{superficial}} \quad (4)$$

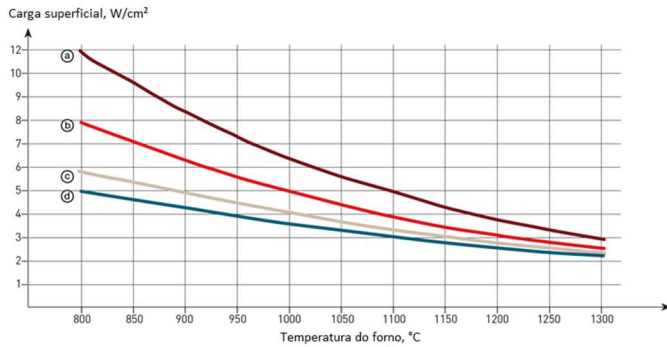


Fig.3 Carga superficial máxima em relação a temperatura do forno.

A definição do diâmetro e passo dos enrolamentos baseia-se na recomendação do fabricante, a qual está indicada na Fig.4. Logo, com o intuito de evitar um número de voltas demasiado para o enrolamento, descrita pela equação 5, optou-se pelo limiar máximo de 8 vezes a espessura do fio.

$$N_{voltas} = \frac{L_r}{p} \quad (5)$$

Onde, N_{voltas} descreve o número de voltas do enrolamento e p descreve o perímetro da seção transversal do enrolamento.

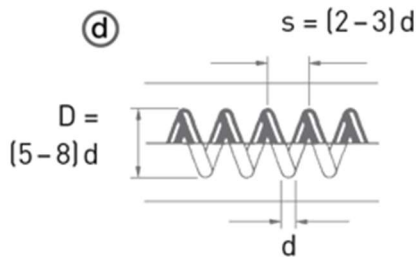


Fig.4 Recomendações geométricas para o enrolamento.

Por fim, é possível verificar se o passo s está dentro dos limites recomendados mediante a equação 6, sendo L_e o comprimento (mm) disponível para a alocação das resistências no interior do forno.

$$s = \frac{L_e}{N_{voltas}} \quad (6)$$

C. Dimensionamento térmico

Nesta etapa, determina-se a espessura da parede de isolamento, de forma a atender os requisitos do projeto, bem como das normas de segurança. Logo, deve-se definir a temperatura de trabalho, a temperatura da superfície externa do forno, a temperatura do ar e a temperatura da vizinhança, conforme apresentadas na Tabela III, respectivamente.

TABELA III. DEFINIÇÃO DAS TEMPERATURAS

Valores de temperaturas °C (K)	
T_{trab}	800 (1073)
T_s	70 (343)
T_{∞}	25 (298)
T_{viz}	25 (298)

A determinação de T_s foi feita com base no limiar de queimadura inferido pela ABNT NBR 13970-1997, que trata da temperatura de superfícies acessíveis. Portanto, conforme a norma, o contato da pele durante um segundo com a superfície lisa aquecida de metal, na temperatura estabelecida, não causará queimadura [14]. Já para as temperaturas T_{∞} e T_{viz} , foi considerada a temperatura ambiente.

As Fig.5, 6 e 7 apresentam os desenhos esquemáticos das paredes do forno, com o respectivo circuito térmico equivalente, para posterior análise térmica com base nos modos de transferência de calor.

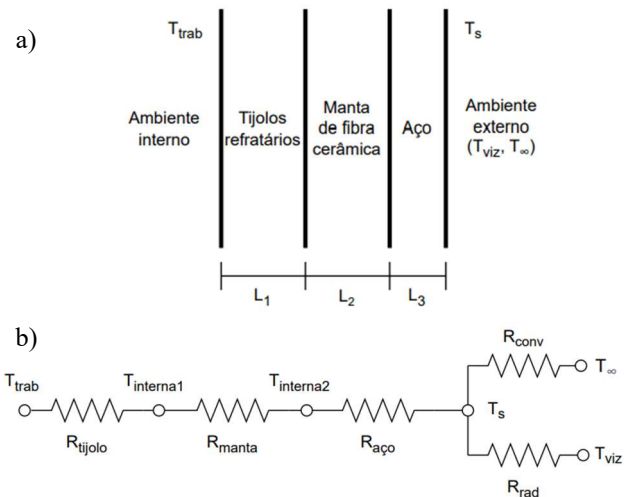


Fig.5 (a) Esquemático e (b) circuito térmico das paredes laterais, posterior e porta do forno.

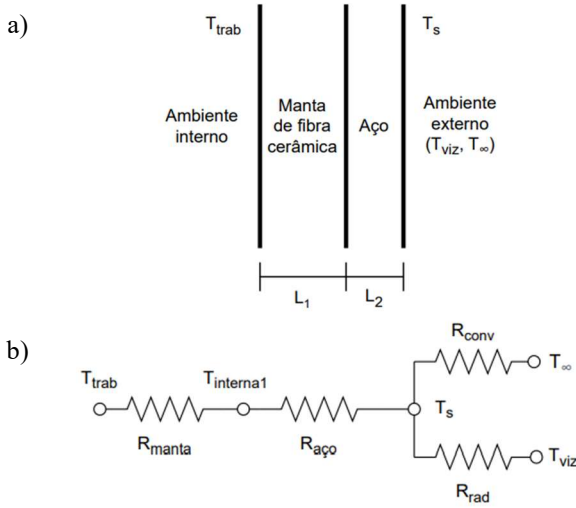


Fig.6 (a) Esquemático e (b) circuito térmico da parede superior do forno.

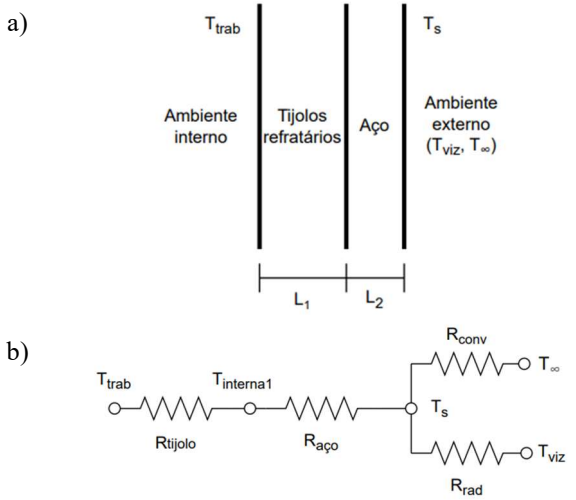


Fig.7 (a) Esquemático e (b) circuito térmico da parede inferior do forno.

Para a análise térmica, é realizado o balanço de energia entre o calor transferido por condução através da parede, e o calor perdido para o ambiente externo por radiação e convecção, conforme apresenta a equação 7.

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (7)$$

Com base na equação anterior, nos circuitos térmicos e nas equações 8, 9 e 10, que representam as resistências térmicas por condução, convecção e radiação, respectivamente, obtém-se por manipulação a equação 11 [2].

$$R_{t.cond} \equiv \frac{T_1 - T_2}{Q_{cond}} = \frac{L}{kA} \quad (8)$$

$$R_{t.conv} \equiv \frac{T_s - T_\infty}{Q_{conv}} = \frac{1}{hA} \quad (9)$$

$$R_{t.rad} \equiv \frac{T_s - T_{viz}}{Q_{rad}} = \frac{1}{h_r A} \quad (10)$$

$$\frac{T_{trab} - T_s}{\frac{L_{tijolo}}{k_{tijolo}A} + \frac{L_{manta}}{k_{manta}A} + \frac{L_{aço}}{k_{aço}A}} = \frac{T_s - T_\infty}{\frac{1}{hA}} + \frac{T_s - T_{viz}}{\frac{1}{h_r A}} \quad (11)$$

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{viz})(T_s^2 + T_{viz}^2) \quad (12)$$

Já a equação 12 apresenta o coeficiente de transferência de calor por radiação h_r , onde, ε corresponde à emissividade da superfície (0,13 para o aço) e σ representa a constante de Stefan-Boltzmann (equivalente à $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) [15].

Para determinar o coeficiente de convecção natural h aplicado na equação 11, faz-se uso da equação 13, onde a condutividade térmica k a ser utilizada é a do ar e o número de Nusselt Nu , para placas verticais, é obtido por intermédio da equação 14 [16].

$$h = \frac{Nu \times k}{L_c} \quad (13)$$

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \times Ra^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (14)$$

Contudo, para placas horizontais, as quais se incluem as faces superior e inferior do forno, utilizam-se as equações 15 e 16, respectivamente, para determinação do número de Nusselt [16].

$$Nu = 0,54 \times Ra^{\frac{1}{4}} \quad (15)$$

$$Nu = 0,27 \times Ra^{\frac{1}{4}} \quad (16)$$

O número de Rayleigh é obtido mediante a equação 17, enquanto que o número de Prandtl do ar, aplicado na equação 14, advém da Tabela V, referente às propriedades do ar na temperatura de filme T_f de 320,5 K, calculada a partir da média entre T_s e T_∞ . Os valores da Tabela V são obtidos a partir da interpolação dos valores da Tabela IV.

$$Ra = \frac{g \times \beta \times (T_s - T_\infty) \times L_c^3}{\nu \times \alpha} \quad (17)$$

Dos termos acima, g representa a aceleração gravitacional, β representa o coeficiente de dilatação térmica, T_s e T_∞ descrevem a temperatura de superfície e de fluido, respectivamente, L_c representa o comprimento característico da geometria, ν a viscosidade cinemática e α a difusividade térmica.

TABELA IV. PROPRIEDADES DO AR À PRESSÃO ATMOSFÉRICA

Temperatura (K)	Viscosidade e cinemática ν (m ² /s)	Condutividade térmica k (W/m.K)	Difusividade térmica α (m ² /s)	Prandtl I
300	15,89.10 ⁻⁶	26,3.10 ⁻³	22,5.10 ⁻⁶	0,707
350	20,92.10 ⁻⁶	30,0.10 ⁻³	29,9.10 ⁻⁶	0,700

TABELA V. PROPRIEDADES DO AR NA TEMPERATURA DE FILME

Temperatura (K)	Viscosidade e cinemática ν (m ² /s)	Condutividade térmica k (W/m.K)	Difusividade térmica α (m ² /s)	Prandtl I
320,7	17,97.10 ⁻⁶	27,83.10 ⁻³	25,56.10 ⁻⁶	0,704

O coeficiente de dilatação térmica β para os gases é obtido através da equação 18, enquanto que o comprimento característico L_c é obtido pela expressão 19, para as paredes inferior e superior do forno. Para as demais faces, que são verticais, adota-se o valor da sua altura [16].

$$\beta = T_f^{-1} \quad (18)$$

$$L_c = \frac{A}{\text{perímetro}} \quad (19)$$

Como primeiro material de isolamento, optou-se pelo uso de tijolos isolantes, mais precisamente de sílica diatomácea, que apresenta uma condutividade térmica 0,3 W/m.k [15]. As dimensões de cada tijolo conferem em 227 x 110 x 43 mm.

Para a segunda camada da parede do forno, optou-se pela manta de fibra cerâmica de densidade 96 kg/m³, com temperatura máxima de uso de 1260° C e condutividade térmica máxima de 0,100 W/m.K [15]. Além disso, sua espessura comercial é de 12,7 mm.

A terceira e última camada é composta por chapas de aço de espessura 2 mm, com condutividade térmica de 56,7 W/m.K [15].

Sendo assim, a Tabela VI contém os dados que, em conjunto com os dados da Tabela V e demais informações técnicas apresentadas nessa seção, possibilitam os cálculos que determinam os valores necessários para as espessuras das camadas isolantes.

TABELA VI. DADOS DE ENTRADA PARA O DIMENSIONAMENTO TÉRMICO

Dados de entrada		
k_{tijolo}	Condutividade térmica do tijolo (W/m.K)	0,30
k_{manta}	Condutividade térmica da manta de fibra cerâmica (W/m.K)	0,10
$k_{\text{aço}}$	Condutividade térmica do aço (W/m.K)	56,7
k_{ar}	Condutividade térmica do ar (W/m.K)	0,023
L_{manta}	Espessura da camada de manta de fibra cerâmica lateral e posterior (m)	0,013
$L_{\text{tij.p}}$	Espessura da camada de tijolo na porta (m)	0,043
$L_{\text{aço}}$	Espessura da camada de aço (m)	0,002
β	Coeficiente de dilatação térmica do ar (K ⁻¹)	0,003
g	Aceleração da gravidade (m/s ²)	9,810
P	Profundidade do espaço interno (m)	0,300
H	Altura do espaço interno (m)	0,300
C	Comprimento do espaço interno (m)	0,300

O dimensionamento parte do cálculo das áreas das paredes internas, o que possibilita determinar os comprimentos característicos. Em seguida, é possível calcular os números de Rayleigh e Nusselt e, consequentemente, os coeficientes de transferência de calor por convecção natural. Por fim, obtêm-se as espessuras das camadas de tijolos para as paredes laterais, posterior e inferior, além da camada de manta de fibra cerâmica da porta e da parede superior.

D. Dimensionamento do contrapeso da porta

A abertura da porta foi projetada como do tipo alavanca, e escamoteável para cima, logo, é preciso obter a massa necessária do contrapeso, de forma a impedir o fechamento indesejado da porta, ou seja, sem o manuseio do

operador. A Fig.8 apresenta o modelo de alavanca que será utilizado, bem como as forças e distâncias relacionadas para o seu dimensionamento, com seus valores expressos na Tabela VII.

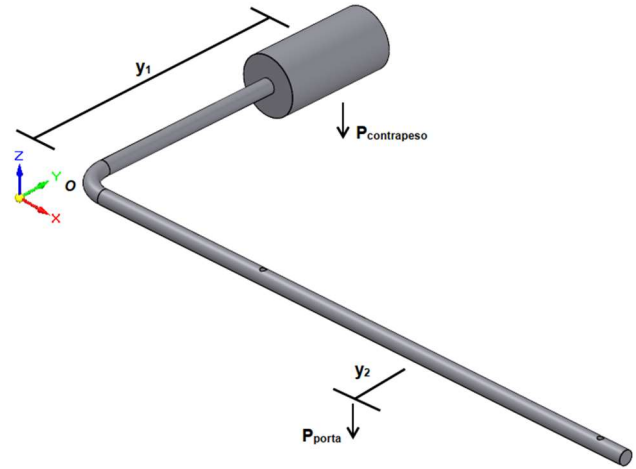


Fig.8 Diagrama de corpo livre da alavanca da porta.

TABELA VII. DISTÂNCIAS E FORÇAS PESO APLICADAS NA ALAVANCA

Distâncias e forças peso	
y_1	0,250 m
y_2	0,027 m
P_{porta}	47,19 N

Para obter o $P_{\text{contrapeso}}$, aplica-se a condição de equilíbrio da alavanca, realizando o somatório de momentos no eixo X em relação ao ponto O, igualando-os a zero, como apresenta a equação 20.

$$\Sigma M_x = (P_{\text{contrapeso}} \cdot y_1) - (P_{\text{porta}} \cdot y_2) = 0 \quad (20)$$

Onde, $P_{\text{contrapeso}}$ representa a força peso do contrapeso (N), P_{porta} a força peso da porta (N), e y_1 e y_2 descrevem as distâncias das respectivas forças em relação ao eixo X.

A massa mínima para o contrapeso é expressa em gramas pela equação 21.

$$P_{\text{contrapeso}} = m \times g \quad (21)$$

Obtida a massa e em posse da massa específica do material (ferro-fundido: 7832 kg/m³), obtêm-se o seu volume através da equação 22 e, por conseguinte, o diâmetro do componente pela equação 23 [15].

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (22)$$

$$v = \frac{\pi \times D^2 \times a}{4} \quad (23)$$

Onde, ρ representa a massa específica do material, v o volume, D o diâmetro e a o comprimento do cilindro.

E. Projeto tridimensional em software

Nesta seção são apresentadas imagens do projeto do equipamento, desenvolvido a partir do *software* de modelagem CAD SOLIDWORKS®.

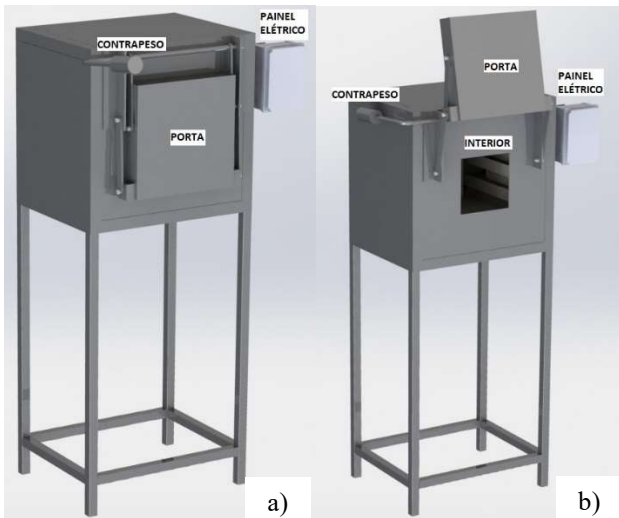


Fig.9 Imagem renderizada do forno com a (a) porta fechada e com a (b) porta aberta.

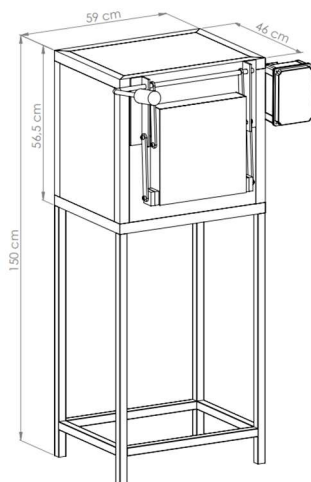


Fig.10 Medidas gerais do forno.

F. Projeto elétrico

No painel elétrico, acoplado lateralmente ao forno, são utilizados um disjuntor bifásico de 40 A (DG), uma chave liga/desliga (S1), uma lâmpada de sinalização de painel energizado (H1), uma contatora tripolar 220 V/40 A (K) e um controlador de temperatura Novus N1200. O circuito também conta com um sensor termopar tipo K acoplado no interior do forno, além das resistências em série fixadas nas paredes laterais, conectadas por terminais cerâmicos localizados na parte posterior do equipamento. A Fig.11 apresenta o projeto elétrico descrito, desenvolvido no software EPLAN Electric P8®.

Optou-se pelo uso da rede trifásica 380 V (220 V Fase-Neutro) do campus devido a intensidade da corrente de que necessita o circuito, sendo constatado que a rede monofásica do local seria insuficiente. Portanto, uma fase será destinada à alimentação do controlador e lâmpada de sinalização, enquanto a outra alimenta as resistências e a última permanece inutilizada.

G. Ensaio experimental

Após as etapas de dimensionamento e construção terem sido concluídas, os experimentos práticos de funcionamento foram executados, utilizando o controle do tipo on-off para o acionamento das resistências. Além do mais, os testes foram realizados com o forno a vazio, a fim de obter resultados globais. Sendo assim, o primeiro conjunto de dados coletado teve origem no ciclo de aquecimento, partindo da temperatura ambiente e alcançando os 800°C predeterminados. Ao atingir a temperatura de operação, o equipamento se manteve nesta faixa de funcionamento por mais 60 minutos, garantindo a homogeneização da temperatura interna, bem como a estabilidade térmica de todos os componentes construtivos. Em seguida, o circuito de potência que energiza as resistências elétricas foi desabilitado, para que desta forma o equipamento entrasse em um processo de resfriamento natural, com a temperatura decrescendo dos 800°C até os 100°C.

Os dados de aquecimento e resfriamento do interior do equipamento foram coletados por meio de utilização de sensor termopar tipo K, com faixa de medição de -200 a 1260°C. Para a obtenção de temperatura de superfície externa, utilizou-se o termômetro infravermelho modelo ST-600.00, da marca Incotherm®, com faixa de medição correspondendo entre -60°C

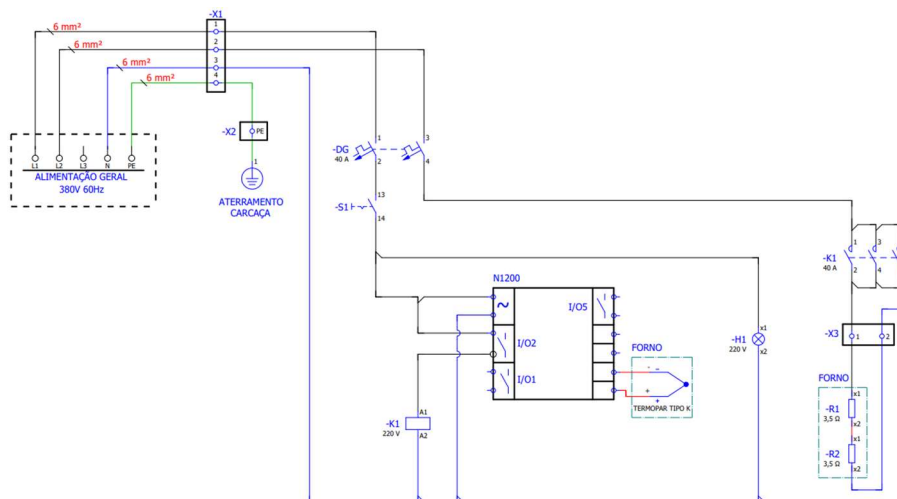


Fig.11 Diagrama Elétrico.

e 500°C, e precisão de $\pm 2\%$ da leitura ou $\pm 2^\circ\text{C}$, sendo considerado o maior valor.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Resultados do dimensionamento elétrico

Os resultados referentes ao dimensionamento da potência do forno, bem como das resistências elétricas, são apresentados na Tabela VIII.

TABELA VIII. RESULTADOS DIMENSIONAMENTO RESISTÊNCIA

Grandezas elétricas	Valor
d	0,003 m
P	7 kW
I	31,8 A
R	6,9 Ω
R_{20}	6,7 Ω
L_r	32,7 m
D	0,024 m
N_{voltas}	433
L_e	2,4 m
S	0,006 m
$\rho_{superficial}$	0,28 W/cm ²

Pode-se afirmar, portanto, que a carga superficial está abaixo do valor máximo de referência da Fig.3, validando assim, o diâmetro selecionado para o fio. Ademais, o passo s também se encontra dentro do limite (entre 2 e 3 vezes o diâmetro) estabelecido pela fabricante, o que valida o espaço interno disponibilizado para a alocação das resistências.

Com o intuito de aquecer o interior do forno igualmente por toda a sua extensão, optou-se por alocar duas resistências de iguais características mecânicas, e, portanto, elétricas, conectadas em série e localizadas nas laterais internas do equipamento. Logo, os valores de comprimento e número de voltas de cada uma são metade do que apresentadas na Tabela VIII, dividindo o valor da resistência elétrica entre elas.

B. Resultados do dimensionamento térmico

Os resultados referentes ao dimensionamento térmico do forno são apresentados pela Tabela IX, com destaque para as quatro últimas variáveis, correspondentes às espessuras das camadas isolantes obtidas.

TABELA IX. RESULTADOS REFERENTES AO DIMENSIONAMENTO TÉRMICO

Resultados do cálculo de espessura do isolamento térmico		
L_{c1}	Comprimento característico das paredes laterais (m)	0,30
L_{c2}	Comprimento característico das paredes superior/inferior (m)	0,075
Ra_1	Número de Rayleigh para as paredes laterais (adimensional)	77,94.10 ⁶
Ra_2	Número de Rayleigh para as paredes superior/inferior (adimensional)	1,22.10 ⁶
Nu_1	Número de Nusselt para as paredes laterais (adimensional)	3,364
Nu_2	Número de Nusselt para a parede superior (adimensional)	17,95
Nu_3	Número de Nusselt para a parede inferior (adimensional)	8,97
h_1	Coefficiente de convecção natural lateral (W/m ² .K)	0,312
h_2	Coefficiente de convecção natural superior (W/m ² .K)	5,505
h_3	Coefficiente de convecção natural inferior (W/m ² .K)	2,751
h_r	Coefficiente de transferência de calor por radiação (W/m ² .K)	0,975
$L_{tijolo1}$	Espessura da camada isolante de tijolo lateral e posterior (cm)	15,0
$L_{tijolo2}$	Espessura da camada isolante de tijolo inferior (cm)	13,0
L_{manta1}	Espessura da camada isolante de manta superior (cm)	6,4
L_{manta2}	Espessura da camada isolante de manta na porta (cm)	3,8

C. Resultados do dimensionamento do contrapeso

A Tabela X apresenta os resultados referente ao dimensionamento do contrapeso da porta, com destaque para as duas últimas dimensões que são utilizadas para usinagem da peça.

TABELA X. RESULTADOS DIMENSIONAMENTO CONTRAPESO

Dimensões do contrapeso	
$P_{contrapeso}$	14,5 N
g	9,81 m/s
m	1,5 kg
v	0,00019 m ³
a	0,1 m
d	0,058 m

D. Análise Geral Construtiva

Concluídos todos os dimensionamentos, deu-se início ao processo de construção do forno. Os elementos secundários e os processos de montagem foram selecionados e implementados de maneira a atender às necessidades do projeto. Logo, tratando-se de um protótipo, os elementos auxiliares não passaram por um estudo detalhado, uma vez que não eram o foco principal da pesquisa. Em razão disso, a estrutura de aço e os componentes elétricos secundários utilizados apresentaram características de superdimensionamento, garantindo tanto a rigidez e o suporte estrutural quanto a condução e fornecimento de energia aos elementos principais durante seu funcionamento. A Fig.12 apresenta o protótipo construído, com todas as suas etapas concluídas, inicialmente com o acesso ao seu interior fechado.

Em seguida, a Fig.13 demonstra o equipamento com a porta aberta, permitindo o acesso ao seu interior. Por fim, a Fig.14 apresenta o forno em pleno funcionamento, com a temperatura de operação de 800°C.

Destarte, observando as Fig.12, 13 e 14 é possível avaliar que as técnicas de construção e montagem utilizadas apresentaram resultados satisfatórios, fornecendo um produto final que atende aos requisitos preestabelecidos de funcionamento com um design de construção adequado.



Fig.12 Forno fechado.



Fig.13 Forno aberto e painel elétrico.



Fig.14 Interior do forno durante funcionamento.

E. Análise Experimental

Os testes experimentais realizados tiveram como objetivo coletar dados práticos referentes à operação normal do equipamento a vazio, relacionando parâmetros de aquecimento e resfriamento em função do tempo. Dessa maneira, são apresentados os resultados obtidos com os elementos de geração de calor desenvolvidos, bem como a eficiência operacional do isolamento térmico aplicado.

1. Ciclo de Aquecimento

A partir da coleta dos dados referentes a temperatura interna do forno, tornou-se possível construir o gráfico que representa a curva de aquecimento do equipamento, demonstrado na Fig. 15.

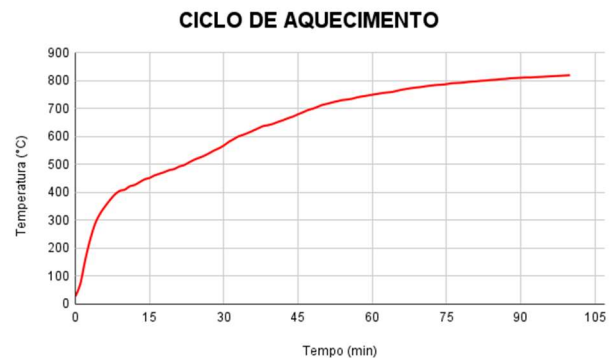


Fig.15 Gráfico do ciclo de aquecimento do forno (°C x min).

Pode-se observar, a partir do gráfico, que o eixo das ordenadas descreve a temperatura interna do equipamento em graus Celsius, partindo do seu valor ambiente em 28°C e seguindo até a temperatura de operação de 820°C, aproximadamente. O eixo das abscissas, por sua vez, apresenta o tempo em minutos.

Nota-se, apesar da inércia térmica inicial atrelada ao sistema, conseqüente do repouso térmico dos componentes internos do forno, o pouco tempo demandado para que fossem atingidos os 100°C, com cerca de 1 minuto e 20 segundos. Essa taxa de aquecimento, de aproximadamente 70°C/min, manteve-se constante até os 300°C, onde há uma queda até atingir os 400°C, gerando uma curva no gráfico. Contudo, a partir de então, entre os valores de 400 e 700°C notou-se uma linearidade na curva, apresentando uma ascensão constante, porém, com uma taxa bastante inferior, de 7,5°C/min, aproximadamente. Por fim, até alcançar os 800°C objetivos, levou-se cerca de 35 minutos, resultando em uma taxa ainda menor, de 2,8°C/min.

Apesar dos parâmetros de potência terem sido calculados considerando um tempo de aquecimento de 120 minutos, a temperatura-alvo foi alcançada com cerca de 82 minutos. Isso é justificado pelo fato do teste ter sido realizado com o forno em vazio, demandando uma quantidade menor de calor e tempo para o aquecimento pleno.

Ressalta-se que foi utilizada a potência nominal das resistências de forma ininterrupta até a temperatura de operação do sistema.

2. Ciclo de Resfriamento

Neste ensaio foram analisados, através de gráfico, os dados referentes ao resfriamento natural do forno, obtidos

após um período de 60 minutos de estabilidade térmica a 800°C, em um ambiente isento de correntes de ar externas. Os resultados são apresentados na Fig. 16.

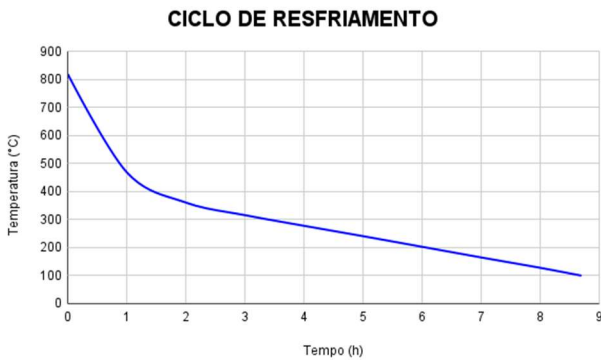


Fig.16 Gráfico do ciclo de resfriamento do forno (°C x h).

Diferentemente do gráfico do ciclo de aquecimento, o gráfico da Fig.16 visa demonstrar a efetividade do isolamento térmico do sistema a partir do tempo de resfriamento. O eixo das ordenadas traz novamente a temperatura em graus Celsius e em múltiplos de 100, enquanto que o eixo das abcissas representa o tempo em horas, devido ao longo período do ensaio.

Posto isso, observou-se a partir do ciclo de resfriamento, uma alta taxa inicial de decaimento da temperatura, avaliada em cerca de 350°C/h, mantida constante entre os valores de 820 e 470°C. Entretanto, entre 470 e 360°C houve uma mudança no comportamento do gráfico, representada através de uma curva, onde, nesse intervalo, a taxa média decaiu para 110°C/h, aproximadamente. A partir de então, o gráfico apresentou um comportamento praticamente linear até os 100°C, com uma taxa média aproximada de 40°C/h, resultando em quase 9 horas para o fim do ciclo.

A abrupta queda inicial de temperatura pode ser justificada pelo gradiente de temperatura elevado entre o interior do forno e o ambiente externo, havendo por consequência elevada transferência de calor por convecção (natural) e radiação. Logo, a medida que o interior perde temperatura, o gradiente é reduzido e o resfriamento torna-se cada vez mais lento.

Por fim, avaliando os dados coletados, pode-se afirmar que o isolamento térmico apresentou boa eficiência, apesar da alta taxa inicial de resfriamento, sendo, contudo, normal. Logo, a resistência à troca de calor proporcionada, provocando um resfriamento lento de cerca de 9 horas, possibilita de fato o uso do forno em tratamentos térmicos de recozimento, por exemplo, onde o aço é resfriado dentro do equipamento de maneira lenta e constante após ser aquecido a uma temperatura de 570 a 670°C.

3. Temperatura da Superfície Externa

O teste experimental de avaliação da temperatura externa do gabinete metálico do forno representa uma das etapas de maior importância, responsável pela validação das técnicas de dimensionamento utilizadas. Os dados foram coletados após a estabilização térmica da estrutura na temperatura máxima de operação, onde os valores máximos obtidos são apresentados na Tabela XI.

TABELA XI. RESULTADOS DA MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DAS SUPERFÍCIES EXTERNAS

Face	Temperatura
Porta	83,1°C
Parede lateral direita	63,1°C
Parede lateral esquerda	58,4°C
Parede superior	106,1°C
Parede inferior	46,2°C
Parede posterior	69,8°C

Os resultados apresentados demonstram que a temperatura das superfícies externas das paredes laterais, posterior e inferior comportaram-se como o esperado, não ultrapassando o limite estabelecido de 70°C indicado pela NBR 13970. Contudo, na superfície externa superior e na porta houve um incremento de 36,1 e 13,1°C, respectivamente, do limite estipulado. A justificativa para ambos os casos pode ser dada pela compactação da manta de fibra cerâmica ao revestir o forno, reduzindo a espessura e, por consequência, afetando o isolamento. Ademais, a ausência do fator de segurança nos cálculos de dimensionamento térmico classifica-se como outra causa provável.

Tal acréscimo, porém, não implica em mau funcionamento do equipamento, exigindo apenas atenção redobrada e o uso de equipamentos de proteção individual durante a operação, sendo um comportamento já esperado ao lidar com altas temperaturas.

F. Sugestões para trabalhos futuros

Como recomendações para trabalhos futuros, tem-se: uso de fator de segurança no dimensionamento do isolamento térmico, a substituição da controladora por um relé de estado sólido, possibilitando o uso do controle PID ao invés do controle on-off utilizado - o que traria a necessidade de um dissipador de calor adequado devido a potência do sistema - e a diminuição das ranhuras para alojamento das resistências, reduzindo o deslocamento das mesmas conforme aquecem e deformam. Ademais, a realização de análises metalográficas a partir de um componente tratado nesse equipamento seria um tópico de bastante valia para o meio acadêmico.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo apresentou o desenvolvimento de um forno elétrico resistivo, capaz de alcançar temperaturas com cerca de 800°C, possibilitando sua utilização em tratamentos térmicos de revenimento, recozimento, normalização e têmpera em aço, por exemplo, ou até mesmo na fusão de alumínio.

Em vista disso, os resultados mostraram-se satisfatórios, obtendo ciclos de aquecimento e resfriamento condizentes com os objetivos estabelecidos no início do projeto. Da mesma forma, a estrutura mecânica demonstrou ser robusta e confiável, essencial para as finalidades didáticas do projeto. Entretanto, com a temperatura de duas superfícies externas ultrapassando os limites definidos pela norma de referência, apesar de não causar mau funcionamento, gera a necessidade da revisão dos cálculos em projetos futuros como mencionado na seção anterior.

Por fim, conclui-se que o projeto atendeu os parâmetros estipulados, apesar de possíveis aprimoramentos, sendo agora destinado às demandas didáticas do IFSC campus Criciúma, servindo como uma ferramenta importante para a docência da instituição.

REFERÊNCIAS

- [1] PINEDO, Carlos E. Tratamentos térmicos superficiais de aços. São Paulo: Editora Blucher, 2021. *E-book*. ISBN 9786555062212. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555062212/>. Acesso em: 25 abr. 2024.
- [2] BAUMGARTNER, Lucas; MIRANDA, Diego Alves. Aplicação de tratamentos térmicos em diferentes ligas metálicas ferrosas. [S. l.], 6 set. 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/354383861_APLICACAO_DE_TRATAMENTOS_TERMICOS_EM_DIFERENTES_LIGAS_METALICAS_FERROSAS. Acesso em: 20 mar. 2024.
- [3] CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. São Paulo: ABM, 2008.
- [4] MACHADO, Izabel F. Tratamentos térmicos e de superfície. [S. l.], 2020. Disponível em: http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/Tratamento_termico_e_superficial.p df. Acesso em: 15 abr. 2024.
- [5] SENAI. Tratamento térmico. Itatiba - SP, 2000. Disponível em: https://docente.ifsc.edu.br/claudio.schaeffer/material/2_Mecatronica/Materiais_1_Meca_2/Apostila_%20Tratamento_Termico_Complementar.pdf. Acesso em: 10 abr. 2024.
- [6] DEBACO, Alex Moccellini. Dimensionamento e fabricação de um forno resistivo elétrico vertical tipo mufla. Caxias do Sul, 2021. Disponível em: <https://repositorio.cesuca.edu.br/jspui/bitstream/123456789/4885/1/TC%20-%20Alex%20Debaco.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2024.
- [7] NEACĂ, Andreea Maria; NEACĂ, Mitićă Iustinian; BUNCIU, Elena. Thermal treatment in electrical resistive ovens: modeling and simulation of the air temperature and the parts to be treated. [S. l.], 2012. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6231891>. Acesso em: 18 mar. 2024.
- [8] CLEMENTINO, Lucas Dias; MOURA JUNIOR, Paulo Cesar de; RIBEIRO, Renan Benedito; MOREIRA, Farney Coutinho. Desenvolvimento e fabricação de um forno de fundição elétrico para fins de pesquisa acadêmica. In: Simpósio de excelência em gestão e tecnologia, 7, 2020, Associação Educacional Dom Bosco, Resende, 2020. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos20/11030137.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2024.
- [9] SANTANA, Victor Hugo Brommem Kamp. Projeto estrutural e térmico de forno elétrico resistivo tipo mufla. Cachoeiro de Itapemirim, 2022. Disponível em: https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/1901/TCF_Santana.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 20 mar. 2024.
- [10] SOUSA, P. J.; et al. A importância dos instrumentos didáticos para alunos da Educação Profissional e Tecnológica: um olhar para o eixo de controle e processos industriais. Revista Brasileira da Educação Profissional e Tecnológica, [S.l.], v. 2, n. 20, p. e11811, dez. 2021. ISSN 2447-1801.
- [11] FILHO, João Mamede. Fornos elétricos. In: FILHO, João Mamede. Instalações elétrica industriais. [S. l.: s. n.], 2007. cap. 8, p. 354-391. ISBN 8521615205.
- [12] BOYLESTAD, Robert L. Introdução à análise de circuitos. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2012. Disponível em: https://www.academia.edu/42323459/Robert_L_Boylestad_12a_EDI%3%87%3%83O. Acesso em: 02 jul. 2024.
- [13] KANTHAL. Kanthal A1: fio de resistência de aquecimento e fio de resistência. [S. l.], 7 fev. 2024. Disponível em: <https://www.kanthal.com/pt-br/produtos-e-servi%C3%A7os/folhas-dados-do-material/fio/fio-de-resist%C3%A7%C3%A3o-de-aquecimento-e-fio-da-resist%C3%A7%C3%A3o/kanthal-a-1/>. Acesso em: 2 jul. 2024.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13970: segurança de máquina: temperatura de superfícies acessíveis. Rio de Janeiro. 1997.
- [15] BERGMAN, Theodore L. Incropera. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2019. E-book. ISBN

9788521636656. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636656/>. Acesso em: 25 abr. 2024.

- [16] ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. Transferência de calor e massa: uma abordagem prática. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2009. *E-book*. ISBN 9788580551280. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580551280/>. Acesso em: 25 abr. 2024. Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, "Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface," IEEE Transl. J. Magn. Japan, vol. 2, pp. 740–741, August 1987 [Digests 9th Annual Conf. Magnetics Japan, p. 301, 1982].

ANEXO A – Energia para elevar a temperatura dos metais (kWh/t).

Material	Temperatura desejada (°C)													
	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Aço	20	38	50	60	90	120	160	175	215	225	250	260	280	295
Gusa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	310	330	345	375
Al	55	80	100	140	170	300	335	370	393	-	-	-	-	-
Cu	-	-	-	57	65	76	90	100	120	135	200	215	223	235
Ag	-	-	27	38	45	50	55	60	105	110	120	127	135	140
Ni	20	38	50	60	85	100	115	140	160	180	195	220	237	333

ANEXO B – Propriedades do fio Kanthal A-1®.

Diâmetro (mm)	Resistência a 20 °C (Ω/m)	Área da superfície por Ω (cm²/Ω)	Peso (g/m)
10,0	0,0185	17017	558
9,5	0,0205	14590	503
8,0	0,0288	8713	357
7,0	0,0377	5837	273
6,0	0,0513	3676	201
5,0	0,0738	2127	139
4,0	0,115	1089	89,2
3,0	0,205	459	50,2