Ciência & Tecnologia
Fatec-JB

ISSN: 2178-9436

PROJETO DE UM FORNO ELÉTRICO INDUSTRIAL PARA TRATAMENTO TÉRMICO TUBOS DE AÇO SA-178 GR A

DESIGN OF AN INDUSTRIAL ELECTRIC FURNACE USED FOR THERMAL TREATMENT SA-178 GR A STEEL TUBES

Gustavo Ribeiro Zanini[I]
Luis Carlos Geron[II]

RESUMO

Este projeto descreve o desenvolvimento de um forno elétrico industrial com dimensões de 3000 x 600 x 500 mm, projetado especificamente para o tratamento térmico de tubos de aço SA-178 Gr A. O objetivo principal é assegurar a uniformidade microestrutural e o alívio de tensões, fatores cruciais para otimizar propriedades mecânicas como ductilidade e tenacidade, prevenindo falhas. O forno é construído com chapa de aço ASTM A36 e possui um isolamento de 150 mm de manta de fibra cerâmica. O sistema de aquecimento, composto por resistências elétricas de 220 V, opera a uma temperatura de 800 °C, considerando uma temperatura ambiente de 35 °C. O projeto foi desenvolvido em conformidade com as normas NR-10 e NR-12, priorizando segurança e eficiência. Os resultados confirmam a viabilidade técnica da proposta e evidenciam vantagens em relação a fornos convencionais a gás, como maior controle térmico, menor impacto ambiental e redução de custos operacionais, reforçando seu potencial de aplicação industrial.

Palavras-chave: forno elétrico; tratamento térmico; isolamento térmico; projeto térmico.

ABSTRACT

This project presents the development of an industrial electric furnace with dimensions of 3000 × 600 × 500 mm, specifically designed for the heat treatment of SA-178 Gr A steel tubes. The main objective is to ensure microstructural uniformity and stress relief, which are critical for optimizing mechanical properties such as ductility and toughness, thereby preventing failures. The furnace is built with ASTM A36 steel plates and insulated with 150 mm of ceramic fiber blanket. The heating system, consisting of 220 V electric resistors, operates at a temperature of 800 °C under an ambient condition of 35 °C. The project was developed in compliance with NR-10 and NR-12 standards, prioritizing safety and efficiency. The results confirm the technical feasibility of the proposal and highlight advantages over conventional gas furnaces, including improved temperature control, reduced environmental impact, and lower operating costs, reinforcing its potential for industrial application.

Keywords: electric furnace; heat treatment; thermal insulation; thermal design.

[1] Estudante do curso superior Tecnólogo em Mecatrônica na Faculdade de Tecnologia Waldyr Alceu Trigo de Sertãozinho (Fatec-Stz) -São Paulo- Brasil. Email:gustavostz114@gmail.com
[2] Prof. na Faculdade de Tecnologia Waldyr Alceu Trigo de Sertãozinho (Fatec-Stz) -São Paulo-Brasil. Email: luis.geron@fatec.sp.gov.br

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB

ISSN: 2178-9436

Data de submissão do artigo: 06/10/2025.
Data de aprovação do artigo: 19/11/2025.
DOI: https://doi.org/10.52138/citec.v17i01.437

1 INTRODUÇÃO

A normalização térmica é fundamental no setor metalúrgico, particularmente para componentes que operam em condições severas, como os tubos de aço carbono SA-178 Gr A empregados em caldeiras industriais. A produção desses tubos, que implica uma diminuição considerável do diâmetro (de 76,2 mm para 50,8 mm em um comprimento de 220 mm), gera tensões remanescentes e heterogeneidades na sua microestrutura. Tais falhas afetam diretamente a durabilidade, a performance e a segurança do produto quando em uso.

Este trabalho sugere o desenvolvimento de um forno elétrico industrial para garantir a homogeneidade mecânica e a integridade microestrutural requeridas, com o objetivo de tratar as pontas dos tubos através do calor. O desenvolvimento do forno envolveu desafios técnicos relacionados ao dimensionamento das resistências elétricas e à definição da espessura do isolamento térmico, equilibrando eficiência energética, segurança e viabilidade construtiva. Quando comparado a fornos a gás, o modelo proposto apresenta vantagens adicionais, como maior estabilidade térmica, menor impacto ambiental, facilidade de automação e redução dos custos operacionais associados ao consumo de combustível. A operação segura do seu negócio é uma prioridade, planejada de acordo com as regulamentações brasileiras de segurança, como a NR-10 (Brasil, 2023a) e a NR-12 (Brasil, 2023b).

Este artigo tem como objetivo principal detalhar o projeto deste forno, com o intuito de padronizar a microestrutura das extremidades dos tubos após a conformação mecânica, assegurando assim um desempenho otimizado em operação. Para isso, o presente trabalho abrange a fundamentação teórica do projeto, a metodologia de desenvolvimento, os cálculos de transferência de calor, as especificações dos componentes selecionados e a análise da viabilidade técnica da solução proposta.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A literatura técnica reforça a importância do tratamento térmico de normalização para materiais como o aço SA-178 Gr A, promovendo refino de grãos e alívio de tensões (Callister, W. D. Jr.2020). Fornos elétricos industriais são preferidos para esse tipo de aplicação devido à precisão no controle de temperatura e menor impacto ambiental em comparação com fornos a gás (Ashby; Jones, 2014). O aço ASTM A36, escolhido para a estrutura do forno, apresenta boa soldabilidade, resistência mecânica satisfatória e custo acessível, sendo amplamente utilizado na indústria de equipamentos térmicos. Já as mantas de fibra cerâmica foram selecionadas como isolante térmico devido à sua condutividade térmica reduzida, cerca de 0,035 W/(m·K), e resistência a temperaturas superiores a 600 °C (Pereira j.c., 2020). A transferência de calor no sistema é governada por condução na parede do forno, convecção natural e radiação térmica, que foram consideradas nos cálculos com base em Incropera et al. (2019). Normas técnicas como a NR-10 e NR-12 (Brasil, 2023a; 2023b) também orientaram o projeto, especialmente no que se refere à segurança elétrica e operação segura em ambientes industriais. O controle de temperatura é crucial para a qualidade do tratamento térmico. De acordo com a Temp-Pro (2023), os termopares tipo K, compostos por níquel-cromo (Chromel) e níquel-alumínio (Alumel), apresentam faixa de operação de –200 °C a 1.300 °C e precisão de até ±2,2 °C, sendo amplamente utilizados em aplicações industriais como a normalização térmica. A norma ASTM

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

E230/E230M-17 corrobora sua adequação para medições precisas em ambientes de alta temperatura (ASTM International, 2017), reforçando a confiabilidade desses sensores quando aplicados corretamente.

3 PROCEDIMENTO E MATERIAIS

O projeto foi desenvolvido com base nas especificações técnicas de um forno elétrico industrial destinado para o tratamento térmico de tubos metálicos. Os materiais e componentes selecionados foram definidos com o objetivo de garantir resistência mecânica, isolamento térmico eficiente e conformidade com normas de segurança ocupacional (NR-10 e NR-12).

Os principais elementos construtivos são descritos a seguir:

- Estrutura metálica: Aço carbono ASTM A36, espessura de 4,7 mm, devido à sua boa conformabilidade, resistência mecânica e ampla disponibilidade no setor metalúrgico.
- Isolamento térmico: mantas de fibra cerâmica industrial com 150 mm de espessura, escolhida por sua baixa condutividade térmica (k=0,04 W/(m.K) e resistência ao fogo, sendo adequada para temperaturas superiores a 600 °C.
- Sistema de aquecimento: Resistências elétricas blindadas com potência total de 3,05 kW, alimentadas a 220 V, dimensionadas para compensar as perdas térmicas e atingir a temperatura operacional de 800 °C.
- Sensor de temperatura: Termopar tipo K, apropriado para medições em altas temperaturas, apresentam faixa de operação de –200 °C a 1.300 °C e precisão de até ±2,2 °C acoplado a um painel de controle digital para leitura e regulagem.
- Aberturas técnicas: 15 orifícios de 80 mm de diâmetro para passagem das extremidades dos tubos a serem tratados, com vedação parcial para minimizar perdas de calor.
- Ambiente de operação: Temperatura ambiente considerada de 25 °C, com umidade relativa não controlada.

3.1 Cálculo da transferência de calor

A transferência de calor por condução através das paredes do forno foi determinada utilizando a Lei de Fourier, considerando a resistência térmica equivalente de camadas em série. Essa abordagem é fundamental para calcular a perda de calor e otimizar a eficiência energética do equipamento. A equação para o cálculo da resistência térmica total é apresentada como 01:

$$\text{Rtotal} = \frac{\text{Laço}}{\text{Kaço}} + \frac{\text{Llã}}{\text{Klã}} \quad (1)$$

Onde cada variável representa:

Rtotal: Resistência térmica total das paredes do forno (m².K/W).

Laço: Espessura da camada de aço (m). Valor adotado: 0,005 m (5 mm), referente à chapa de aço ASTM A36.

Llã: Espessura das mantas de fibra cerâmica (m). Valor adotado: 0,150m, referente ao isolamento térmico.

kaço: Condutividade térmica do aço (W/(m·K)). Valor adotado: 45 W/(m·K), típico para aço carbono (Cengel; Ghajar, 2021).

klã: Condutividade térmica das mantas de fibra cerâmica (W/(m·K)). 0,04 W/(m·K) (Incropera et al., 2019), valor representativo para mantas de fibra cerâmica utilizadas em isolamento de fornos.

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

Essa abordagem permite calcular a eficiência do isolamento e, consequentemente, a perda de calor do forno para o ambiente.

$$\text{Rtotal} = \frac{0{,}0047\ \text{m}}{45\ w/(m.k)} + \frac{0{,}150\ \text{m}}{0{,}04\ w/(m.k)} = 0{,}0001044\ m^2 + 3{,}7501\ \text{m}^2.k/w = 3{,}7501044\ \text{m}^2.\text{k/w} \quad (1)$$

Para os materiais utilizados, considerou-se kaco = 45 W/ (m.k) e klã = 0,04 W/ (m.k) (Incropera et al., 2019), a aplicação da Equação (1) resultou em uma resistência térmica total de aproximadamente Rtotal = 3, 7501m².K/W

A perda de calor por condução foi então calculada pela Lei de Fourier, conforme equação 02:

$$\text{Qconducão} = A.\frac{\Delta\text{T.A}}{Rtotal} \quad (2)$$

Onde:

- Qconducão é a perda de calor por condução, em Watts (W).
- A é a área superficial total de transferência de calor (valor adotado: 6,18 m²).
- ΔT é a diferença de temperatura entre as superfícies (valor adotado: 652 K).
- R é a resistência térmica total do isolamento (valor adotado: 3,754°C/W,).

$$\text{Qconducão} = 6{,}18\ \text{m}^2.\frac{(652\text{K} - 48°\text{C})}{3{,}754\text{K/W}} = 1237{,}97\ \text{W} \quad (2)$$

A diferença de temperatura de ΔT=652 K, obtendo-se uma perda de Qconducão =1237,97 W, (Gráfico - 01).

3.2 Cálculo da perda por convecção natural

A perda de calor por convecção natural refere-se à dissipação térmica da superfície externa do equipamento para o ambiente circundante (Incropera 2019). Esse fenômeno é impulsionado pela diferença de temperatura entre a superfície do forno e o ar adjacente, que, ao ser aquecido, tem sua densidade reduzida conforme equação 03:

$$Qconveccão = h.A.(Text - Tamb) \quad (3)$$

Onde:

- Qconveccão é a perda de calor por convecção, em Watts (W).
- h é o coeficiente médio de troca térmica por convecção (valor adotado: 5 W/(m²·K)).
- A é a área superficial total de transferência de calor (valor adotado: 6,18 m²).
- Text é a temperatura da superfície externa do forno (valor adotado: 48 °C).
- Tamb é a temperatura ambiente (valor adotado: 25 °C).

Aplicando os valores:

$$Qconvecção = 5w\ .\ 6{,}18m^2.(48°C - 25°C) = 828{,}00\ W \quad (3)$$

O valor resultante foi Convecção = 828,00 W.

3.3 Cálculo da perda por radiação térmica

No contexto de fornos industriais elétricos, o cálculo da perda por radiação térmica refere-se à determinação da energia que é emitida da superfície externa do equipamento para o ambiente na forma de ondas eletromagnéticas.

Foi determinada pela Lei de Stefan-Boltzmann conforme a equação 04:

$$Qradiacão = \varepsilon\ .\sigma\ .A\ .(T^4ext - T^4amb) \quad (4)$$

sendo:

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

- Qradiacão é a perda de calor por radiação, em Watts (W).
- ε emissividade superficial = 0,8,
- σ constante de Stefan-Boltzmann σ = 5,67×10−8 W/m², e
- Text temperaturas convertidas para Kelvin Text = 321,15, Tamb = 298,15 K.
- A é a área superficial total de transferência de calor (valor adotado: 6,18 m²).
- Tamb é a temperatura absoluta do ambiente (valor adotado: 298,15 K).

O valor obtido foi Qradiacão = 893,32 W.

Ao somar todas as perdas térmicas estimadas, conforme a equação (5), obteve-se:

$$Qtotal = Qconducão + Qconveccão + Qradiacão = 2973{,}12 \quad (5)$$

Consequentemente, a potência mínima necessária para as resistências elétricas foi determinada conforme a equação (6):

$$\text{Pmínima} = \frac{\text{Qtotal}}{1000} \quad (6)$$

$$\text{Pmínima} = \frac{2973{,}12}{1000} = 2{,}97\,\text{kW} \quad (6)$$

A potência instalada de 3,05 kW é adequada, pois cobre ligeiramente as perdas, mantendo a eficiência e segurança térmica.

Para o isolamento térmico, foi empregada mantas de fibra cerâmica com espessura de 150 mm, material escolhido por sua baixa condutividade térmica e elevada resistência a temperaturas elevadas, o que garante eficiência energética e segurança térmica ao sistema (Pereira et al., 2020)

O gráfico apresenta a relação entre a espessura do isolamento térmico e a perda de calor por condução do projeto, isolado com manta de lã cerâmica de 150 mm de espessura.

Os dados utilizados foram obtidos para espessuras de isolamento variando entre 25 mm e 200 mm, demonstrando uma queda significativa na perda de calor à medida que a espessura do isolamento aumenta. O ponto de operação escolhido (Gráfico 1) representa a condição real do forno com isolamento de 150 mm, resultando em uma perda de calor estimada de aproximadamente 1251,81 W.

Esta redução substancial da perda térmica evidencia a eficiência do isolamento térmico em sistemas industriais de aquecimento, contribuindo diretamente para a economia de energia elétrica e a manutenção de temperaturas internas elevadas com maior estabilidade.

3.4 Dimensionamento das resistências elétricas

Considerando a potência total requerida de 3,05kW e tensão de alimentação de 220 V, o sistema foi dividido em três resistências idênticas.

Cada espira é responsável por cerca de 1016,7 W.

A resistência de cada espira foi calculada conforme a equação (7):

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (7)$$

Onde:

- R é a resistência elétrica da espira, em Ohms (Ω).
- V é a tensão de alimentação aplicada à resistência (valor adotado: 220 V).
- P é a potência elétrica dissipada por cada espira (valor adotado: 1016,7 W).

Aplicando os valores:

$$R = \frac{220^2 V}{1016{,}7W} = 47{,}6\,\Omega \quad (7)$$

O comprimento de fio necessário por espira com fio AWG 20 foi calculado conforme a equação (8):

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

$$L = \frac{R \cdot A}{\rho} \quad (8)$$

Onde:

- L é o comprimento do fio necessário para a espira, em metros (m).
- R é a resistência elétrica da espira (valor adotado: 47,6 Ω).
- A é a área da seção transversal do fio (valor adotado: 5,18×10−7 m², partir do diâmetro de 0,000812 m para um fio AWG 20).
- ρ é a resistividade elétrica do material do fio (valor adotado: 1,09×10−6 Ω·m).
- A = πd² / 4 = π · (0,000812)2 / 4 = 5,18 × 10−7 m²

Logo:

$$L = \frac{47{,}6 \cdot 5{,}18 \times 10^{-7}}{1{,}09 \times 10^{-6}} = 22{,}62\ m \quad (8)$$

Comprimento do fio necessário para cada resistência e de aproximadamente 22,62m.

O número de voltas por espira com diâmetro de 25,7 mm foi calculado conforme a equação (9):

$$Nvoltas = \frac{Lfio}{circunferência} \quad (9)$$

Onde:

- Número de voltas é a quantidade de voltas que o fio forma em cada espira.
- Lfio é o comprimento total do fio por espira (valor adotado: 22,62 m).
- circunferência é o comprimento de uma única volta da espira, em metros (m), calculada a partir do diâmetro de 25,7 mm.
- Sendo a circunferência de cada volta = π·D = π · 0,0257 = 0,0807m

$$Nvoltas = \frac{22{,}62}{0{,}0807} = 280 voltas \quad (9)$$

Tabela 1 - Parâmetros das resistências elétricas

PARÂMETRO	VALOR ESTIMADO
Potência por resistência	1016,7 W
Resistência por espira	47,6 Ω
Comprimento Fio de Níquel-Cromo (NiCr 80/20)	22,62 m
Diâmetro da espira	25,7 mm
Voltas por espira	280 voltas

Fonte: autoria própria (2025)

Segundo Callister (2020), essa fórmula descreve a relação entre tensão elétrica, Resistencia e potência dissipada em materiais condutores.

Para a fabricação dos elementos resistivos, foi escolhido o fio de Níquel-Cromo (NiCr 80/20), devido à sua elevada resistividade elétrica e resistência térmica.

A bitola escolhida foi o AWG 20, que oferece um bom equilíbrio entre comprimento físico e robustez térmica (Figura 03). Dessa forma, cada espira deve ter aproximadamente 22 metros de fio NiCr 80/20 com 1,24 mm de diâmetro, garantindo segurança e eficiência energética. O controle da temperatura interna será realizado por meio de um painel de controle comercial com interface digital, (Figura 05) equipado com kit controlador de temperatura, relé térmico, termopar tipo K e dispositivos de segurança elétrica, de forma a garantir operação precisa.

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

4 MATERIAIS UTILIZADOS

O forno elétrico industrial projetado, com dimensões internas de 3000 mm x 600 mm x 500 mm, (Figura 01) foi construído a partir de uma seleção criteriosa de materiais, cada um justificado por suas propriedades e adequação à aplicação de tratamento térmico em altas temperaturas.

Estrutura Externa: Fabricada em aço carbono ASTM A36 com espessura de 4,7mm. Este material foi selecionado pela sua alta resistência mecânica, excelente soldabilidade e custo-benefício, sendo amplamente empregado em construções industriais.

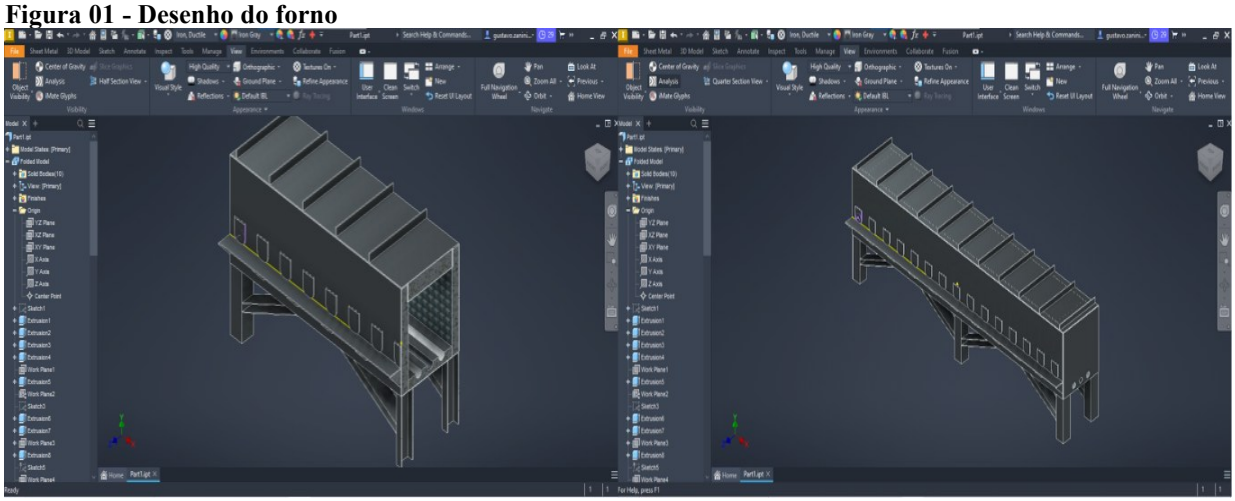
Isolamento Térmico: Utilizou-se mantas de fibra cerâmica industrial com 150mm de espessura (Figura 02). A escolha se deve à sua baixa condutividade térmica (k=0,04 W/m.K) e capacidade de suportar temperaturas superiores a 600 °C, minimizando as perdas de calor e garantindo a eficiência energética.

Sistema de Aquecimento: Composto por resistências elétricas blindadas, totalizando uma potência instalada de 3,05 kW, alimentadas em 220 V. Essas resistências foram dimensionadas especificamente para alcançar e manter a temperatura operacional de 800 °C (Figura 04).

Sensor de Temperatura: Para o controle térmico, empregou-se um termopar tipo K. Este tipo de termopar é amplamente reconhecido por sua precisão e confiabilidade em medições de altas temperaturas, sendo integrado a um painel de controle digital para monitoramento contínuo e ajuste da temperatura.

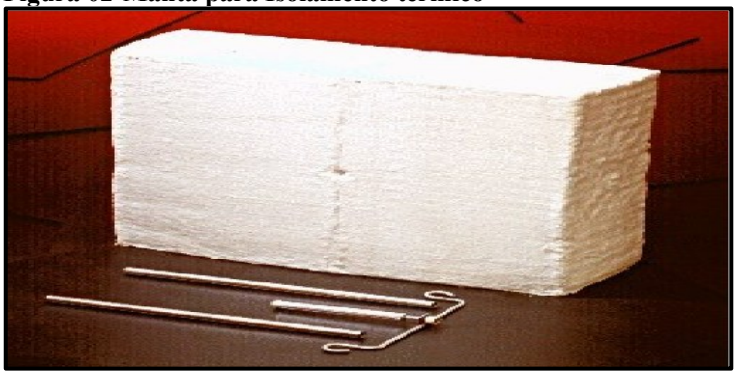
As aberturas para passagem dos tubos (15 orifícios de 80 mm de diâmetro) foram projetadas para incluir vedação parcial, a fim de otimizar a retenção de calor.

Figura 01 - Desenho do forno



Fonte: autoria própria (2025), ferramenta Autodesk Inventor (versão2025)

Figura 02-Manta para Isolamento térmico



Fonte: Termocom (2025)

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

Figura 3 - Fio de Níquel-Cromo (NiCr 80/20)



Disponível em: Altanatubes (2025)

Figura 4-Resistncia- Fio de Níquel-Cromo (NiCr 80/20)



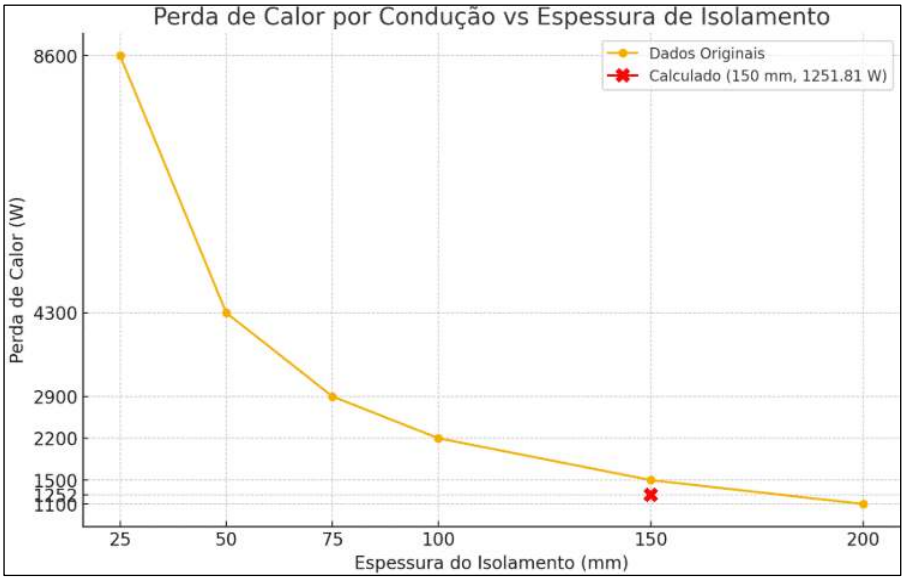
Disponível em: Altanatubes (2025)

Figura-05 Painel comandos e controle



Fonte: Casa das Resistências (2025)

Gráfico 01- Perda de calor



Fonte: autoria própria (2025) - Microsoft Office Excel 2019

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB
ISSN: 2178-9436

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

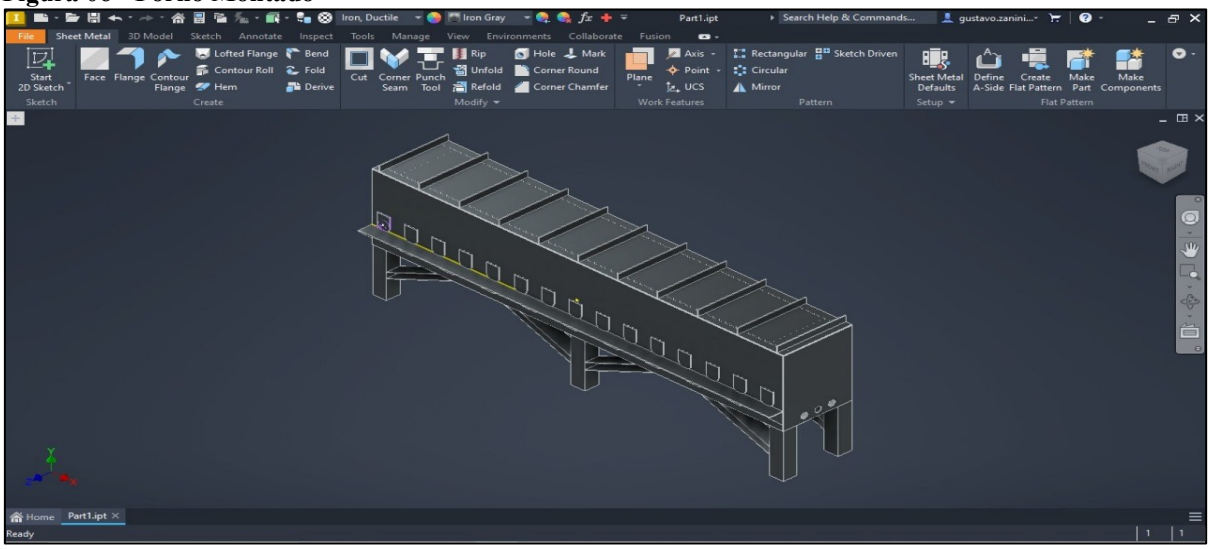
O sistema de aquecimento do forno foi configurado com três resistências elétricas blindadas, estrategicamente distribuídas de forma homogênea ao longo do comprimento útil da câmara, assegurando uma distribuição uniforme de temperatura. Para a confecção dos elementos resistivos, foi utilizado fio de Níquel-Cromo (NiCr 80/20), selecionado por sua elevada resistividade elétrica e resistência a altas temperaturas, características ideais para aplicações em ambientes industriais severos (Figura 2). A resistividade elétrica adotada para os cálculos foi de: $\rho=1{,}09\times10-6\Omega\cdot m$ (Ashby; Jones, 2014). Embora o fio Kanthal A-1® tenha sido considerado durante a fase de projeto por sua excelente durabilidade e desempenho em temperaturas superiores a 1200 °C e compatibilidade com sistemas de controle automático, a escolha final e a fabricação se deram com o NiCr 80/20, que atendeu plenamente às especificações de operação a 800 °C.

Para o controle da temperatura interna foi utilizado um painel de controle comercial com interface digital, equipado com kit controlador de temperatura, relé térmico, termopar tipo K e dispositivos de segurança elétrica, de forma a garantir operação precisa.

As análises térmicas foram conduzidas considerando um ambiente externo a 35 °C e uma temperatura operacional interna de até 800 °C. Os cálculos de transferência de calor basearam-se nos mecanismos clássicos de condução, convecção e radiação, conforme descrito por Incropera et al. (2019), possibilitando a estimativa da potência térmica necessária para manter as condições de operação sem exceder a capacidade do sistema, em conformidade com os limites normativos de segurança ocupacional e elétrica estabelecidos pelo Ministério do Trabalho (Brasil, 2023a; 2023b).

Essa abordagem metodológica visou garantir o desempenho térmico adequado do forno, bem como sua segurança estrutural e funcional durante o ciclo completo de operação industrial.
Durante o desenvolvimento do projeto, alguns desafios técnicos se destacaram, especialmente no dimensionamento das resistências elétricas e na definição da espessura do isolamento térmico, de modo a equilibrar eficiência energética e segurança operacional. A escolha final pelo fio NiCr 80/20 foi resultado da necessidade de compatibilizar durabilidade, custo e desempenho em operação contínua a 800 °C. Além disso, em comparação com fornos industrial a gás, o sistema elétrico proposto apresenta maior controle da temperatura, distribuição homogênea de calor e menor impacto ambiental, ao mesmo tempo em que reduz riscos relacionados à combustão e ventilação. Esses aspectos reforçam a originalidade e aplicabilidade industrial do projeto.

Figura 06 - Forno Montado



Fonte: autoria própria (2025), elaborado por meio da ferramenta Autodesk Inventor (versão2025)

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB

ISSN: 2178-9436

6 CONCLUSÃO

O projeto do forno elétrico industrial desenvolvido demonstrou viabilidade técnica e plena compatibilidade com os requisitos operacionais para o tratamento térmico de tubos de aço SA-178 Gr A. Através de uma abordagem criteriosa de engenharia térmica, que incluiu a análise de transferência de calor, a seleção adequada de materiais e o cumprimento rigoroso das normas regulamentadoras NR-10 e NR-12, concebeu-se um sistema eficiente e seguro, capaz de promover o alívio de tensões e a homogeneização microestrutural dos componentes metálicos.

A utilização de mantas de fibra cerâmica com espessura adequada foi crucial para minimizar as perdas térmicas e assegurar a segurança térmica externa. A divisão do sistema de aquecimento em três resistências ao longo do forno garantiu uma uniformidade de temperatura superior, permitindo atingir e manter 800 °C com estabilidade e controle preciso.

Os resultados obtidos fornecem uma base sólida para a construção e aplicação prática deste equipamento em ambientes industriais.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a realização de simulações por método dos elementos finitos para otimizar a distribuição térmica e avaliar a integridade estrutural, além da integração de sistemas de controle automatizado para maior eficiência energética, rastreabilidade e confiabilidade operacional.

REFERÊNCIAS

ALTANATUBES. **Fio 16 AWG 500g**. Altanatubes, 2025. Disponível em: https://www.altanatubes.com.br/webstore/?Id=4304&T=Fio-16-Awg-500g. Acesso em: 19 mar. 2025.

ASHBY, M. F.; JONES, D. R. H. **Materiais de engenharia 1**: introdução às propriedades, aplicações e design. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E230/E230M-17:** Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora NR-10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**. Brasília, 2023a.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora NR-12 – Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos**. Brasília, 2023b.

CALLISTER, W. D. Jr. **Fundamentos da ciência e engenharia dos materiais**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

CASA DAS RESISTÊNCIAS. **Painel de controle**. Casa das Resistências, 2025. Disponível em: https://casadasresistencias.com.br/produto/painel-de-controle. Acesso em: 19 mar. 2025.

CENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2021.

Ciência & Tecnologia
Fatec-JB

ISSN: 2178-9436

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

PEREIRA, J. C.; SILVA, A. M.; COSTA, R. H. Propriedades térmicas de isolantes aplicados em fornos industriais. **Revista Brasileira de Engenharia Térmica**, v. 29, n. 2, p. 95–102, 2020.

TEMP-PRO, INC. **Thermocouples**. Temp-Pro, 2023. Disponível em: https://temp-pro.com/products/thermocouples. Acesso em: 6 mar. 2025.

TERMOCOM. **Módulos de fibra cerâmica**. Termocom, 2024. Disponível em: https://www.termocom.com.br/modulos-de-fibra-ceramica. Acesso em: 5 mar. 2024.