

Projeto e fabricação de um forno de fundição elétrico

Design and manufacture of an electric foundry furnace

VITOR JÚNIOR SOUSA SILVA
Discente de Engenharia Mecânica, UNIPAM
E-mail: vitorjss09@gmail.com

JANAÍNA APARECIDA PEREIRA
Professora orientadora (UNIPAM)
E-mail: janainaap@unipam.edu.br

Resumo: A fundição é um dos processos de fabricação e reciclagem de metais mais importantes na indústria. O trabalho descreve o desenvolvimento de um forno de fundição por resistência elétrica, projetado para atingir até 1200 °C, capaz de derreter 2 litros de alumínio e, potencialmente, outros metais como o cobre. O projeto assistido por computador (CAD) foi elaborado, gerando uma lista de materiais para a montagem e dados necessários para calcular a perda de calor por condução, convecção e radiação para dimensionar o projeto elétrico. A montagem contém tijolos refratários, isolamento de manta cerâmica, estrutura metálica, controlador de temperatura, resistência Kanthal® A-1 (FeCrAl). Foi derretido com sucesso alumínio entre 26 a 30 minutos e cobre em 1 hora e 40 minutos, necessitando de ajuste manual de temperatura para o cobre. O equipamento demonstrou estabilidade para uso contínuo na fundição de alumínio, com baixa deterioração na estrutura e fio da resistência.

Palavras-chave: forno para fundição; isolamento; refratário; alumínio; cadinho.

Abstract: Foundry is one of the most important metal manufacturing and recycling processes in the industry. The work describes the development of a resistance electric melting furnace, designed to reach up to 1200 °C, capable of melting 2 liters of aluminum and potentially other metals such as copper. Computer-aided design (CAD) was elaborated, generating a materials list for assembly and data necessary to calculate heat loss by conduction, convection, and radiation to size the electrical design. The assembly contains refractory bricks, ceramic blanket insulation, metal structure, temperature controller, Kanthal® A-1 (FeCrAl) resistance. Aluminum was successfully melted between 26 to 30 minutes and copper in 1 hour and 40 minutes, requiring manual temperature adjustment for copper. The equipment demonstrated stability for continuous use in aluminum casting, with low deterioration in the structure and resistance wire.

Keywords: melting furnace; insulation; refractory; aluminum; crucible.

1 INTRODUÇÃO

A fundição do alumínio, do cobre e de suas ligas é essencial no processo produtivo, estando presente em diversas indústrias, como as áreas automotiva, naval,

hidráulica, utensílios, eletrodomésticos, moldes, entre inúmeras outras aplicações. Na engenharia, é utilizado o método de vazamento de metais fundidos para a produção de protótipos de pesquisa e desenvolvimento, com menor custo e em menor tempo.

O vazamento do material derretido no molde é uma das etapas mais críticas na fundição, uma vez que o comportamento do líquido e sua posterior solidificação e resfriamento determinam se será adequado ao uso e se estará livre de defeitos internos, portanto controlar a temperatura ajuda a mitigar problemas do processo (Beeley, 2001). Esse processo, simples e eficaz, tem sido muito aprimorado com a ajuda de *softwares* de desenho assistido por computador (CAD), máquinas de usinagem com controle numérico computadorizado (CNC) e impressão 3D, viabilizando muitos projetos de peças (Lesko, 2012).

As fundições são um dos maiores contribuintes para o movimento de reciclagem de industrializados no mundo. Para se derreter metais, é necessária uma grande quantidade de energia e, na reciclagem do alumínio, a economia em relação à produção primária pode chegar a 95%, e, no caso do cobre, até 85% (Lund, 2000). De acordo com a pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Fundição (ABIFA) em março de 2023, a indústria brasileira de fundição empregou 62.934 colaboradores diretos, sendo que 85,6% da produção foi absorvida no mercado interno.

A escassez de fornos de fundição elétricos compactos, de alta potência, com um bom volume, não estacionários e de origem nacional é um atrativo em comparação com os modelos que usam mistura de gases como combustíveis. O uso de energia elétrica traz praticidade em relação a combustíveis fósseis, eliminando a necessidade de sistemas de alimentação e exaustão adicionais, possibilitando mais controle da temperatura e evitando defeitos no metal vazado. Diante do exposto, questiona-se: é possível montar um forno de fundição compacto e não estacionário para fundir e processar alumínio e cobre?

Este estudo tem como hipótese que é possível projetar e produzir um forno de fundição elétrico compacto, mediante o dimensionamento térmico correto para fundir alumínio e cobre utilizando resistência de arame.

O objetivo geral do presente estudo é projetar e produzir um forno de fundição elétrico de modo a obter dados práticos para analisar seu funcionamento. Um controlador de temperatura eletrônico será usado para atingir a temperatura de vazamento de até 1200 °C para derretimento e superaquecimento de metais. Considerando o objetivo geral, foram listados os seguintes objetivos específicos: dimensionar a geometria do forno com isolamento, dimensionar o elemento de aquecimento para 1200 °C, preparar o sistema elétrico dentro das normas técnicas, produzir ferramenta de teste, fundir dois litros de alumínio no tempo alvo de 26 minutos, obter dados de consumo elétrico e aquecimento em função do tempo, comparar dados práticos com os dados teóricos e analisar o desempenho com volume reduzido no cobre.

1.1 PROPRIEDADES PARA FUNDIÇÃO E VAZAMENTO DE METAIS

Na fundição, quando o metal fundido é vazado na cavidade do molde, ele deve preencher todas as partes antes de se solidificar, ou a peça fundida será incompleta. A

propriedade do metal fundido de preencher o molde é conhecida como fluidez e depende da composição química da liga, temperatura, intervalo de solidificação e principalmente do superaquecimento, que é o quanto o metal fundido está acima de sua temperatura final de fusão (Kiminami; Castro; Oliveira, 2013). De acordo com Baldam e Vieira (2014), o controle da temperatura adequada de vazamento é necessária, pois a liga metálica superaquecida, apesar de ter sua fluidez aumentada, também tem um aumento no consumo de energia, absorção de gases, turbulência, aumento no uso de desoxidantes e na reação metal-molde. Entretanto, uma temperatura de vazamento baixa gera peças defeituosas por juntas frias e falta de preenchimento do molde, logo se soma a temperatura de fusão com a temperatura de superaquecimento, mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 — Temperatura de vazamento indicada para algumas ligas metálicas

Ligas	Temperatura de fusão da liga (°C)	Sobreaquecimento (°C)
Alumínio	550 a 660	50 a 100
Cobre	825 a 1.083	70 a 120
Ferros fundidos	1.130 a 1.350	50 a 150
Aços	1.400 a 1.525	50 a 150

Fonte: Baldam e Vieira, 2014.

1.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

O tijolo refratário é um material cerâmico feito de uma mistura de sílica e uma alta quantidade de alumina. O tijolo com densidade de 800 kg/m³ suporta até 1430 °C, possui condutividade térmica de $k_t = 0,35$ W/m·K a 1200 °C (Morgan Advanced Materials, 2023) e emissividade entre $\varepsilon_t = 0,64$ e 0,39 no intervalo de temperatura de 400 e 1400 °C. (Jones; Mason; Williams, 2019).

A manta cerâmica isolante é feita de óxidos de alumina e sílica de alta pureza. Ela é produzida em diferentes densidades e apresenta propriedades distintas. Com densidade de 128 kg/m³, suporta até 1260 °C e tem condutividade térmica de $k_m = 0,13$ W/m·K a 600 °C (Morgan Advanced Materials, 2021).

O alumínio liga 3004 é uma liga de boa conformabilidade e resistência à corrosão, utilizada em diversos produtos, como latas, utensílios de cozinha e tanques. Possui condutividade térmica de $k_a = 163$ W/m·K a 25 °C (ASM International, 1990) e emissividade entre $\varepsilon_{al} = 0,04$ a 0,07 no intervalo de temperatura de 27 e 627 °C (Jones; Mason; Williams, 2019).

O cadinho é feito de grafite denso, com calor específico de 719 J/kg·°C a 25 °C e 1800 J/kg·°C a 700 °C (Pierson, 1993).

1.3 PROPRIEDADES DOS METAIS

A Tabela 2 apresenta algumas propriedades consideradas importantes para a realização deste estudo, como a massa específica, calor específico na temperatura ambiente, calor específico na temperatura de fusão e calor latente.

Tabela 2 – Propriedades relevantes do cobre e alumínio

Ligas	Massa específica (kg/m ³)	Calor específico (J/kg·°C)		Calor latente (J/kg)
Cobre	8930	386 a 25 °C	494 a 1083 °C	204900
Alumínio	2700	900 a 25 °C	1180 a 660 °C	397000

Fonte: ASM International, 1990.

1.4 EQUAÇÕES PARA DIMENSIONAMENTO DO FORNO

Para produzir um forno de fundição elétrico de resistência de arame eficiente, é necessário calcular a energia necessária para aquecer e manter a temperatura alvo, levando em consideração a perda de calor para o ambiente. Também é essencial considerar a geometria e todos os materiais a serem usados na fabricação, bem como o metal que será fundido. Nesta seção são listadas as principais equações.

1.4.1 Taxa de transferência de calor

A taxa de transferência de calor é a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de 1 kg de uma substância em 1 °C. Essa taxa pode ser calculada somando-se o calor sensível em diferentes estados físicos, juntamente com o calor latente de mudança de fase, em uma faixa de temperatura específica. A taxa de transferência de calor pode ser determinada dividindo a quantidade total de calor transferido pelo intervalo de tempo correspondente (Çengel; Ghajar, 2012).

$$\dot{q} = \frac{c_s m(T_2 - T_\infty) + L_f m + c_f m(T_a - T_2)}{\Delta t} \quad (1)$$

\dot{q} = taxa de transferência de calor, W

c_s = calor específico sólido, J/kg·°C

m = massa, kg

T_2 = temperatura fusão, °C

T_∞ = temperatura do ambiente, °C

L_f = calor de fusão, J/kg

c_f = calor específico fundido, J/kg·°C

T_a = temperatura alvo, °C

Δt = tempo de aquecimento, s

1.4.2 Coeficiente de transferência térmica (h)

Para calcular o coeficiente de convecção nas paredes do forno, é necessária uma série de cálculos relacionados à geometria de superfície e à temperatura de película entre a superfície aquecida e o meio ambiente (fluido).

O coeficiente de expansão volumétrica da substância (β) expressa uma variação da densidade do fluido em termos de uma diferença de temperatura para pressão constante, para cálculo, utiliza-se 1 dividido pela temperatura de película ou filme, que

é a média aritmética da temperatura da parede e a temperatura do ambiente de corrente livre (Çengel; Ghajar, 2012):

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (2)$$

T_f = temperatura da película, K

T_s = temperatura da parede, K

T_∞ = temperatura do ambiente (menor temperatura), K

O número de Grashof representa o efeito de convecção natural entre flutuação e a viscosidade dentro do fluido, sendo a razão entre a força de empuxo e a força viscosa agindo sobre o fluido. No caso de um cilindro vertical reto, o comprimento característico (L_c) é o próprio comprimento vertical ou altura (Çengel; Ghajar, 2012). A fórmula para fluxo laminar é:

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

Gr_L = número de Grashof

g = aceleração gravitacional, m/s²

β = coeficiente de expansão volumétrica, 1/K

T_s = temperatura da parede, K

T_∞ = temperatura do ambiente, K

L_c = comprimento característico, m

ν = viscosidade cinemática do fluido, m²/s

O número de Rayleigh é a razão entre as forças de flutuação e o produto das difusividades térmicas e de quantidade de movimento. O escoamento é laminar em placa vertical quando $Ra_L \leq 10^9$ (Çengel; Ghajar, 2012).

$$Ra = Gr_L Pr \quad (4)$$

Ra = número de Rayleigh

Pr = número de Prandtl (tabelado)

O número de Nusselt representa o aumento da transferência de calor através de uma camada de fluido como resultado da convecção em relação à condução do mesmo fluido em toda a camada. Quanto maior o número de Nusselt, mais eficaz será a convecção, sendo $Nu = 1$ condução pura. Um cilindro vertical pode ser considerado como uma placa vertical quando seu diâmetro for suficientemente grande, de modo que os efeitos da curvatura se tornem insignificantes (Çengel; Ghajar, 2012). Para uma placa horizontal com superfície superior quente, faixa de $10^4 \leq Ra_L \leq 10^7; Pr \geq 0,7$:

$$Nu = 0,54Ra^{1/4} \quad (5)$$

Placa horizontal com superfície superior quente, faixa de $10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}$:

$$Nu = 0,15Ra^{1/3} \quad (6)$$

Placa horizontal com superfície inferior quente, faixa de $10^5 < Ra < 10^{11}$:

$$Nu = 0,27Ra^{1/4} \quad (7)$$

Placa vertical toda a faixa Ra:

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

Nu = Nusselt

Ra = número de Rayleigh

O coeficiente de convecção (h) é um parâmetro cujo valor depende de todas as variáveis que influenciam a convecção, como a configuração geométrica da superfície, a natureza do movimento do fluido, suas propriedades e sua velocidade de massa, sendo o coeficiente em que o calor é transferido por unidade de área (Çengel; Ghajar, 2012). A unidade $W/m^2 \cdot ^\circ C$ tem equivalência com a unidade de $W/m^2 \cdot K$, assim como $W/m \cdot ^\circ C$ equivale-se a $W/m \cdot K$.

$$h = \frac{Nuk}{L_c} \quad (9)$$

h = coeficiente de convecção natural, $W/m^2 \cdot ^\circ C$

Nu = Número de Nusselt

k = condutividade térmica do fluido, $W/m \cdot ^\circ C$

L_c = comprimento característico, m

1. 4. 3 Equação combinada de transferência de calor (\dot{q})

Os modos de condução, convecção e radiação ocorrem simultaneamente quando o calor de um fluido quente é transferido para um fluido frio através de uma barreira intermediária. Após a condução para a próxima superfície, o calor é transferido para a vizinhança por convecção e radiação. A equação combinada pode ser escrita em razão da soma das resistências de condução e convecção, conforme mostrado (Çengel; Ghajar, 2012):

$$\dot{q} = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t} \quad (10)$$

$$R_t = \sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (11)$$

ΔT = variação de temperatura parede interna e ambiente externo, °C

R_t = resistência térmica total, °C/W

1. 4. 4 Resistência de condução para diferentes geometrias por fator de forma (S)

Fatores de forma de condução são determinados para uma série de configurações geométricas práticas, gerando fórmulas para cálculos teóricos de transferência de calor (Rohsenow; Hartnett; Cho, 1998). Uma vez que o fator de forma é conhecido para uma geometria específica, a resistência de condução pode ser gerada e usada na fórmula combinada de transferência de calor para a rede de resistências de condução e convecção:

$$R_{cond} = \frac{1}{Sk} \quad (12)$$

Resistência de condução em uma parede plana:

$$R_{cond} = \frac{L}{kA} \quad (13)$$

R_{cond} = resistência térmica de condução, °C/W

L = espessura, m

k = condutividade térmica, W/m·°C

A = área de superfície, m²

Resistência de condução em uma parede cilíndrica:

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (14)$$

r_1 = raio menor, m

r_2 = raio maior, m

L = comprimento ou altura, m

A resistência por convecção também pode ser reescrita como (Çengel; Ghajar, 2012):

(15)

$$R_{conv} = \frac{1}{hA}$$

R_{conv} = resistência de convecção, °C/W

h = coeficiente de convecção natural, W/m².°C

A = área de superfície, m²

1.4.4.1 Fator de forma de condução de um polígono dentro de um polígono (S_o)

O fator de forma de regiões bidimensionais limitadas interna e externamente por polígonos regulares isotérmicos de N lados onde $N \geq 3$ (figura 1), é obtido por meio da expressão geral (Rohsenow; Hartnett; Cho, 1998):

(16)

$$S_o = \frac{4\pi L}{\ln \left[1 + \frac{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1}{\left(\frac{N}{\pi}\right) \tan\left(\frac{\pi}{N}\right)} \right]}$$

S = fator de forma de condução, m

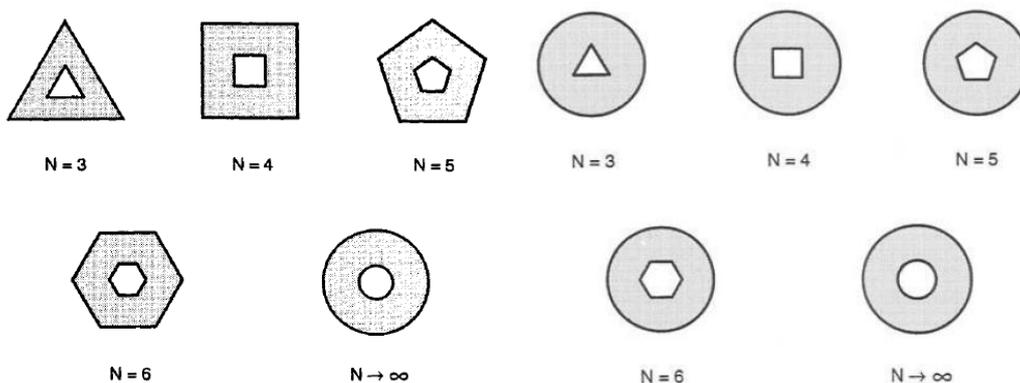
L = comprimento ou altura, m

N = número de lados do polígono

D = diâmetro do círculo inscrito da parede externa do polígono, m

d = diâmetro do círculo inscrito da parede interna do polígono, m

Figura 1 – Lados N em polígonos regulares e polígonos regulares em círculos



Fonte: Rohsenow, Hartnett e Cho, 1998.

1.4.4.2 Fator de forma de condução para polígono dentro de um círculo (S_c)

Regiões limitadas internamente por polígonos regulares isotérmicos de N lados onde $N \geq 3$ (Figura 1) e externamente por um círculo isotérmico, se $0 < d/D < \cos \cos \frac{\pi}{N}$ (Rohsenow; Hartnett; Cho, 1998):

$$S_c = \frac{2\pi L}{\ln \left[A_N \left(\frac{D}{d} \right) \right]} \quad (17)$$

$$A_N = \left[(\sqrt{N} - \sqrt{N-2}) \right]^{\frac{2}{N}} (N-2)^{\frac{1}{N}} \quad (18)$$

L = comprimento ou altura, m

A_N = parâmetro A do polígono

N = número de lados do polígono

d = diâmetro do círculo inscrito da parede interna do polígono, m

D = diâmetro do cilindro círculo externo, m

1.4.5 Perda por radiação

Quando uma superfície com área superficial A_s , de emissividade específica ε e uma temperatura termodinâmica T_s é completamente delimitada por uma superfície maior (ou preta) a uma temperatura T_{cir} separada pelo ar que não interfere na radiação, a taxa de transferência de calor por radiação é dada por (Çengel; Ghajar, 2012):

$$\dot{q} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{cir}^4) \quad (19)$$

\dot{q} = calor transferido por radiação

ε = emissividade

σ = constante de Stefan-Boltzmann, $5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

A_s = área de superfície, m^2

T_s = temperatura de superfície, K

T_{cir} = temperatura das paredes do ambiente, K

1.4.6 Potência térmica total (\dot{q}_t)

A potência térmica total requerida da fonte de calor para manter o corpo na temperatura desejada é a taxa de calor transferida para o metal, mais a soma da taxa de calor perdida através das paredes (Çengel; Ghajar, 2012).

(20)

$$\dot{q}_t = \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3$$

\dot{q}_t = potência total, W

\dot{q}_1 = taxa de transferência de calor ao metal, W

\dot{q}_2 = taxa de perda de calor por condução e convecção, W

\dot{q}_3 = taxa de perda de calor por radiação, W

1.5 DIMENSIONAMENTO DO ELEMENTO DE AQUECIMENTO

1.5.1 Propriedades do elemento de aquecimento

Kanthal A-1 é uma liga de ferro-cromo-alumínio (liga de FeCrAl) para uso em temperaturas de até 1400 °C. Tem como características a alta resistividade e ótima resistência à oxidação (Kanthal, 2019). A resistividade para a temperatura de trabalho é obtida a partir da resistividade na temperatura ambiente, multiplicando pelo fator C_t (figura 2).

Figura 2 — Dimensões e propriedades do fio Kanthal A-1

Resistivity 1.45 Ω mm²/m (872 Ω /cmf). Density 7.10 g/cm³ (0.256 lb/in³).

To obtain resistivity at working temperature, multiply by factor C_t in following table.

°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
C_t	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05
DIAMETER, MM		RESISTANCE AT 20°C			SURFACE AREA PER Ω		WEIGHT		SURFACE AREA		CROSS SECTIONAL AREA				
KANTHAL® A-1	KANTHAL® APM	Ω /M			CM ² / Ω *		G/M		CM ² /M		MM ²				
2.3	2.3	0.349			207		29.5		72.3		4.15				

Fonte: Kanthal, 2019.

A resistência elétrica (R) é baseada na diferença de potencial (U) ao quadrado dividido pela potência (P), como apresentada na equação 21. Com as equações 21 e 22, é possível dimensionar o arame de aquecimento.

$$R = \frac{U^2}{P} \tag{21}$$

$$L = \frac{RA}{\rho \cdot Ct} \tag{22}$$

R = resistência, Ω

U = diferença de potencial, V

P = potência, W

ρ = resistividade, Ω .m

L = comprimento do fio, m

A = área da seção transversal, m

Ct = Fator de correção da temperatura

1.5.2 Número de espiras da bobina

A resistência helicoidal deve ter o comprimento do sulco de alojamento e o passo “ s ” na faixa de duas a três vezes o diâmetro do fio ($s = 3d$) (Kanthal, 2019). O passo e o número de espiras podem ser calculados pelas fórmulas:

(23)

$$s = \frac{\pi \cdot (D - d) \cdot Le}{L}$$

(24)

$$n = \frac{Le}{s}$$

D = diâmetro da espira, m

d = diâmetro do fio, m

s = passo, m

L = comprimento do fio, m

Le = comprimento da bobina, m

n = número de espiras

1.5.3 Comprimento da bobina comprimida

Para fins de usinagem, é necessário considerar a altura da mola comprimida se o comprimento da bobina for muito longo para um barramento de torno dar o passo. O passo é dado manualmente ao fio por tração até obter o comprimento (Le) da bobina.

(25)

$$H = Le - [n \cdot (s - d)]$$

H = altura da bobina comprimida, m

2 METODOLOGIA

O trabalho consiste na realização de uma pesquisa experimental com o objetivo de analisar os aspectos relacionados ao projeto, montagem e funcionamento de um forno elétrico de fundição. Foi conduzido um estudo exploratório, de natureza quantitativa, sendo necessário obter dados como a temperatura alcançada, o tempo necessário para o aquecimento e o consumo elétrico durante o processo de fundição.

Para analisar a potência real consumida, é necessário medir a intensidade da corrente elétrica sendo consumida pelo forno; para isso foi utilizado um alicate amperímetro Fluke 325. O peso do forno e do metal para fundição foi medido na balança digital Multilaser HC024. A temperatura interna do forno foi medida pelo controlador de temperatura REX C100 com termopar tipo K, enquanto a temperatura externa foi medida com termômetro infravermelho Fluke 59 MAX, posicionado no ponto central da lateral e tampa. Todas as medidas foram registradas em função do tempo, obtido no aplicativo cronômetro, padrão de fábrica do celular Samsung Galaxy M52 Android 12.

Os dados coletados de temperatura e tempo foram tratados no software *Microsoft Excel* para gerar gráficos de temperatura em função do tempo e consumo de energia em função do tempo. Isso servirá para comprovar que o uso das fórmulas do referencial teórico gera resultados compatíveis.

2.1 DIMENSIONAMENTO DO CORPO

O projeto é concebido no *software* CAD *Solidworks*, levando em consideração o volume alvo de fundição alvo de 2 litros e o isolamento mínimo para um diâmetro de 50 cm. Para a construção do corpo e da tampa, são utilizados vinte e seis tijolos isolantes com dimensões de 229 x 114 x 76 mm e densidade de 800 kg/m³. Esses tijolos são cortados e lixados para se adequarem às dimensões de encaixe do projeto (decagonal). São feitos sulcos nos tijolos para o assentamento do elemento de aquecimento internamente, rasgo na parte superior para assentamento da corda de fibra de vidro de 12 mm para a vedação da tampa e outros rasgos para o encaixe da estrutura metálica. Devido à abrasividade do material, são utilizadas ferramentas elétricas e manuais com carboneto de tungstênio.

A estrutura metálica é soldada em volta do corpo e da tampa para proporcionar resistência a impactos mecânicos e permitir o deslocamento com rodízios de trava. Essa estrutura é composta de cantoneiras e barras chatas de 1/8 pol., com revestimento externo de alumínio, e a tampa é fixada por dobradiça reforçada junto ao corpo. Entre a estrutura metálica e o alumínio externo, é feito o preenchimento utilizando manta cerâmica isolante com densidade de 128 kg/m³.

2.2 POTÊNCIA NECESSÁRIA

Com os dados da geometria desenhada, é calculada a perda de calor por condução, convecção e radiação, que deverão ser corrigidas na potência inicial para atingir a temperatura alvo no tempo desejado. O coeficiente de convecção térmico interno (conforme Tabela 3), dependente da geometria do forno e de objetos internos, envolve um cálculo complexo. Portanto, foi necessário o uso de simulação computacional do modelo através do *software SolidWorks FLOW Simulation*.

Todos os cálculos consideraram a temperatura ambiente de $T_{\infty} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, com o forno internamente aquecido para $T_i = 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ em 30 minutos, considerando condução sem radiação. O coeficiente de convecção natural externo foi calculado manualmente utilizando as temperaturas externas máximas simuladas por 30 minutos resultantes. A base foi considerada como uma placa circular horizontal com temperatura de superfície $T_b = 25,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$, na lateral como um cilindro vertical reto $T_l = 27,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e no teto como placa horizontal diversa $T_t = 44,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$. A potência total calculada na Tabela 4 para a resistência elétrica é igual à potência necessária para a fusão do alumínio, mais a somada às perdas por condução, convecção e radiação.

Tabela 3 – Compilação de dados para cálculo

Dados	Valor
Coeficiente de convecção interno base, h_{bi}	7,798 W/m ² °C
Coeficiente de convecção interno lateral, h_{li}	2,812 W/m ² °C
Coeficiente de convecção interno teto, h_{ti}	11,238 W/m ² °C
Coeficiente de convecção externo base, h_{be}	1,015 W/m ² °C
Coeficiente de convecção externo lateral, h_{le}	2,187 W/m ² °C
Coeficiente de convecção externo teto, h_{te}	5,236 W/m ² °C
Espessura tijolo isolante na base, L_{bt}	0,101 m

Área interna tijolo isolante na base e teto, $A_{bt} A_{tt}$	0,0321 m ²
Espessura manta cerâmica na base, L_m	0,063 m
Área manta cerâmica na base, A_{bm}	0,100 m ²
Espessura revestimento alumínio, L_{ba}	0,003 m
Área interna do revestimento alumínio na base, A_{bai}	0,192 m ²
Área externa do revestimento alumínio na base, A_{bae}	0,196 m ²
Fator de forma tijolo isolante decágono dentro de um decágono, S_t	0,730 m
Fator de forma manta cerâmica decágono dentro de um círculo, S_m	7,172 m
Espessura tijolo isolante na lateral e teto, $L_{lt} L_{tt}$	0,076 m
Altura interna revestimento alumínio, L_a	0,437 m
Raio interno revestimento de alumínio, r_1	0,247 m
Raio externo revestimento de alumínio, r_2	0,250 m
Área interna total do decágono de tijolo isolante na lateral, A_{lt}	0,180 m ²
Área interna do revestimento alumínio na lateral, A_{lae}	0,691 m ²
Área externa tijolo isolante no teto, A_{tte}	0,1 m ²
Tensão da rede bifásica, U	220 V
Resistividade Kanthal A-1, ρ	1,45E-6 Ω m
Diâmetro do fio Kanthal A-1, d	2,3E-3 m
Comprimento da bobina determinado pelo desenho do sulco, Le	2,56 m
Diâmetro da espira determinado pelo desenho do sulco, D	1,8E-2 m
Área de seção transversal do fio 2,3 mm, A	4,15E-6 m ²

Fonte: elaboração própria, 2023.

De acordo com a Tabela 4, na equação 1 foi necessária uma potência de 6490,686 W, ignorando as perdas, para superaquecer 5,4 kg de alumínio até 760 °C (conforme Tabela 1) em 26 minutos, com o uso do cadinho de grafite como reservatório, que possui espessura elevada e massa de 4,6 kg. Corrigindo essa potência para considerar as perdas, são necessários 6807,771 W.

Tabela 4 – Cálculo da potência total necessária

Tipo	Equação
Calor para fundir 2 L alumínio	$Q_{al} = c_s m (T_2 - T_\infty) + L_f m + c_f m (T_a - T_2)$ $Q_{al} = 900 \cdot 5,4(660 - 25) + 397000 \cdot 5,4 + 1180 \cdot 5,4(760 - 660) = 5867100 J$ $Q_{cd} = c_s m_2 (T_a - T_\infty)$ $Q_{cd} = 4,6 \cdot \left(\frac{719 + 1800}{2} \right) \cdot (760 - 25) = 4258369,5 J$
Taxa de transferência de calor	$\dot{q}_{al} = \frac{Q_{al} + Q_{cd}}{\Delta t} = \frac{5867100 + 4258369,5 J}{1560 s} = 6490,686 W$

Perda por convecção e condução na base	$\dot{q}_b = \frac{T_i - T_\infty}{\frac{1}{h_{bi}A_{bt}} + \frac{L_t}{k_t A_{bt}} + \frac{L_m}{k_m A_{bm}} + \frac{L_a}{k_a A_{bai}} + \frac{1}{h_{be}A_{bae}}}$ $\dot{q}_b = \frac{1200^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}}{\frac{1}{7,798 \cdot 0,0321} + \frac{0,101}{0,35 \cdot 0,0321} + \frac{0,063}{0,13 \cdot 0,1} + \frac{0,003}{163 \cdot 0,192} + \frac{1}{1,015 \cdot 0,196}}$ $\dot{q}_b = 51,405 \text{ W}$
Perda por convecção e condução na lateral	$\dot{q}_l = \frac{T_i - T_\infty}{\frac{1}{h_{li}A_{lt}} + \frac{1}{S_t k_t} + \frac{1}{S_m k_m} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L_a k_a} + \frac{1}{h_{le}A_{lae}}}$ $\dot{q}_l = \frac{1200^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}}{\frac{1}{2,812 \cdot 0,18} + \frac{1}{0,73 \cdot 0,35} + \frac{1}{7,172 \cdot 0,13} + \frac{\ln(0,25/0,247)}{2 \cdot \pi \cdot 0,437 \cdot 163} + \frac{1}{2,187 \cdot 0,691}}$ $\dot{q}_l = 154,122 \text{ W}$
Perda por convecção e condução no teto	$\dot{q}_t = \frac{T_i - T_\infty}{\frac{1}{h_{ti}A_{tt}} + \frac{L_{tt}}{k_t A_{tt}} + \frac{1}{h_{te}A_{tte}}}$ $\dot{q}_t = \frac{1200^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}}{\frac{1}{11,238 \cdot 0,0321} + \frac{0,076}{0,350 \cdot 0,0321} + \frac{1}{5,236 \cdot 0,1}} = 102,651 \text{ W}$
Perda por radiação na área da base	$\dot{q} = \varepsilon_{al} \sigma A_{bae} (T_b^4 - T_\infty^4)$ $\dot{q}_{rb} = 0,07 \cdot 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4 \cdot 0,196 \text{ m}^2 [(298,75)^4 - (298,15)^4] = 0,05 \text{ W}$
Perda por radiação na área lateral	$\dot{q} = \varepsilon_{al} \sigma A_{lae} (T_l^4 - T_\infty^4)$ $\dot{q}_{rl} = 0,07 \cdot 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4 \cdot 0,691 \text{ m}^2 [(300,45)^4 - (298,15)^4] = 0,68 \text{ W}$
Perda por radiação na área do teto	$\dot{q} = \varepsilon_{ti} \sigma A_{tte} (T_t^4 - T_\infty^4)$ $\dot{q}_{rt} = 0,64 \cdot 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4 \cdot 0,1 \text{ m}^2 [(317,45)^4 - (298,15)^4] = 8,177 \text{ W}$
Potência total necessária	$\dot{q}_t = \dot{q}_{al} + \dot{q}_b + \dot{q}_l + \dot{q}_t + \dot{q}_{rb} + \dot{q}_{rl} + \dot{q}_{rt}$ $\dot{q}_t = 6490,686 + 51,405 + 154,122 + 102,65 + 0,05 + 0,68 + 8,177 = 6807,771 \text{ W}$

Fonte: elaboração própria, 2023.

2.3 MONTAGEM ELÉTRICA

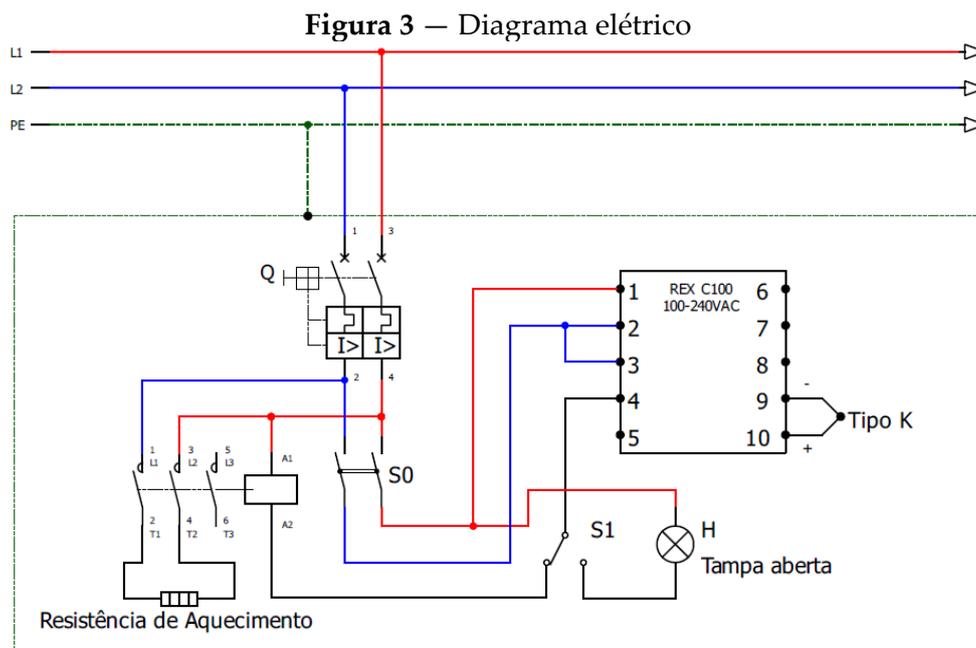
Com a potência e o comprimento do sulco nos tijolos, é escolhido o diâmetro do arame da resistência para a temperatura alvo máxima de 1200 °C, com o fator de correção de 1,04 (figura 2) e então calculados o diâmetro da espira, o passo e o comprimento para encaixe de acordo com a tabela 5. O arame do elemento de aquecimento é enrolado em um eixo para formar a bobina comprimida de 397 espiras em 0,911 m e esticado por tração para dar o passo e encaixar nos 2,56 m de sulco.

Tabela 5 – Dimensionamento da resistência

Resistência	$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220 V^2}{6807,771 W} = 7,11 \Omega$
Comprimento de fio	$L = \frac{RA}{\rho} = \frac{7,11 \Omega \cdot 4,15 \cdot 10^{-6} m^2}{1,45 \cdot 10^{-6} \Omega m * 1,04} = 19,567 m$
Passo da bobina	$s = \frac{\pi \cdot (D - d) \cdot Le}{L} = \frac{\pi \cdot (0,018 m - 2,3 \cdot 10^{-3} m) \cdot 2,56 m}{19,567 m} = 6,453 \cdot 10^{-3} m$
Número de espiras	$n = \frac{Le}{s} = \frac{2,56 m}{6,453 \cdot 10^{-3} m} = 397 \text{ espiras}$
Comprimento da bobina comprimida	$H = Le - [n \cdot (s - d)] = 2,56 m - [397 \cdot (6,453 \cdot 10^{-3} - 2,3 \cdot 10^{-3} m)] = 0,911 m$

Fonte: elaboração própria, 2023.

Com os dados da resistência A-1, foi elaborado o diagrama elétrico da Figura 3 para a montagem dos componentes elétricos. O painel elétrico possui componentes dimensionados para uma corrente superior a 31 A do elemento de aquecimento, operando com 220 V em rede bifásica, em conformidade com as normas de segurança vigentes. Com dimensões de 200 x 200 x 150 mm, o painel é fixado na estrutura externa; ele é composto por disjuntor de 40 A, contator de 40 A, chave seletora de duas posições NA, controlador de temperatura REX C100 com termopar tipo K, fiação normal e para alta temperatura (1,5 e 6,0 mm²), sinalizador branco de tampa aberta e fim de curso de segurança para desligar a resistência quando a tampa for aberta.



Fonte: elaboração própria, 2023.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O forno para fundição construído, como é mostrado em funcionamento na Figura 4, possui um peso de 44,7 kg. Pode ser elevado por duas pessoas e movido com pouco esforço pelos rodízios e com as travas pressionadas; não ocorreu deslocamento algum durante o uso.

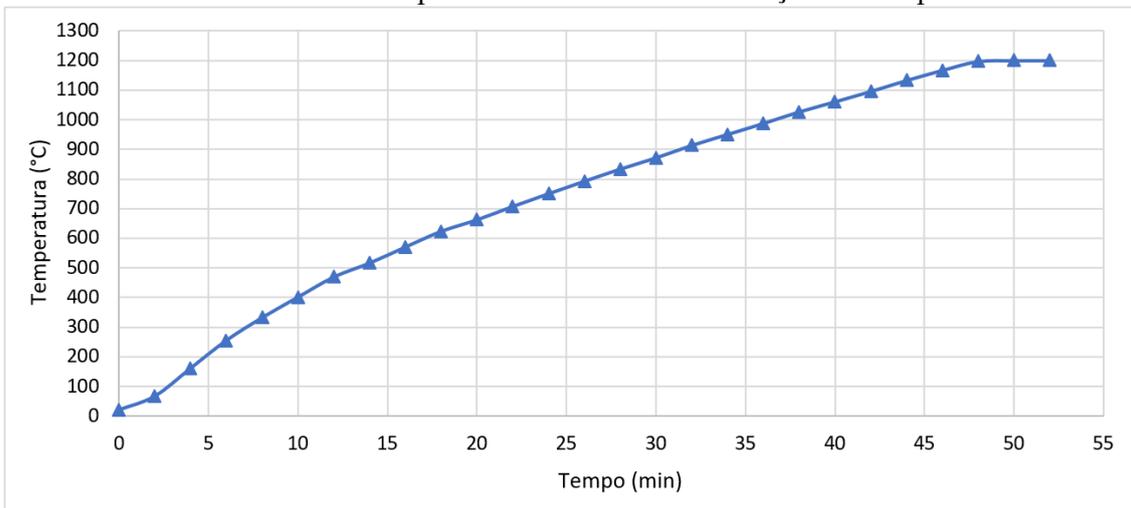
Figura 4 — Forno em funcionamento



Fonte: arquivo dos autores, 2023.

Durante o teste de aquecimento, conforme mostrado no Gráfico 1, o interior do forno atingiu a temperatura programada máxima de 1200 °C em 49 minutos e manteve-se estável por meio do controlador de temperatura em ciclo de aquecimento e resfriamento.

Gráfico 1 — Temperatura no interior em função do tempo

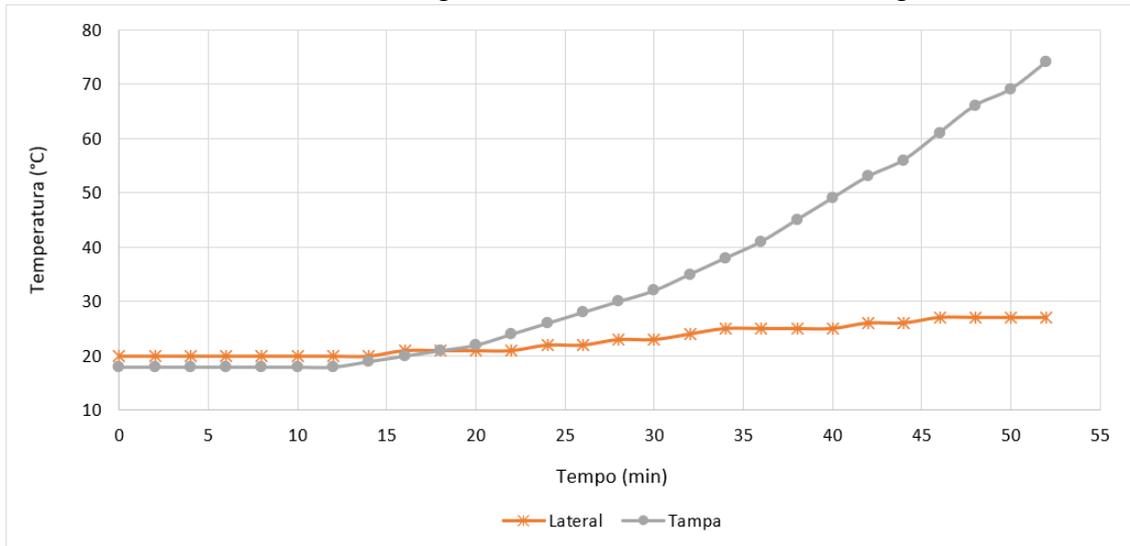


Fonte: elaboração própria, 2023.

Foi observado que o isolamento do forno funciona de forma satisfatória, Gráfico 2, demorando um longo período para o calor atravessar as paredes laterais, sendo atingidos 27 °C em 52 minutos, enquanto a tampa alcançou 74 °C no mesmo tempo. É de se esperar essa maior temperatura na tampa do forno, pois o isolamento é composto

somente pelo tijolo refratário com espessura de 76 mm, enquanto, na lateral, é composto de 76 mm de tijolo, 63 mm de manta cerâmica e 3 mm de alumínio, em ordem.

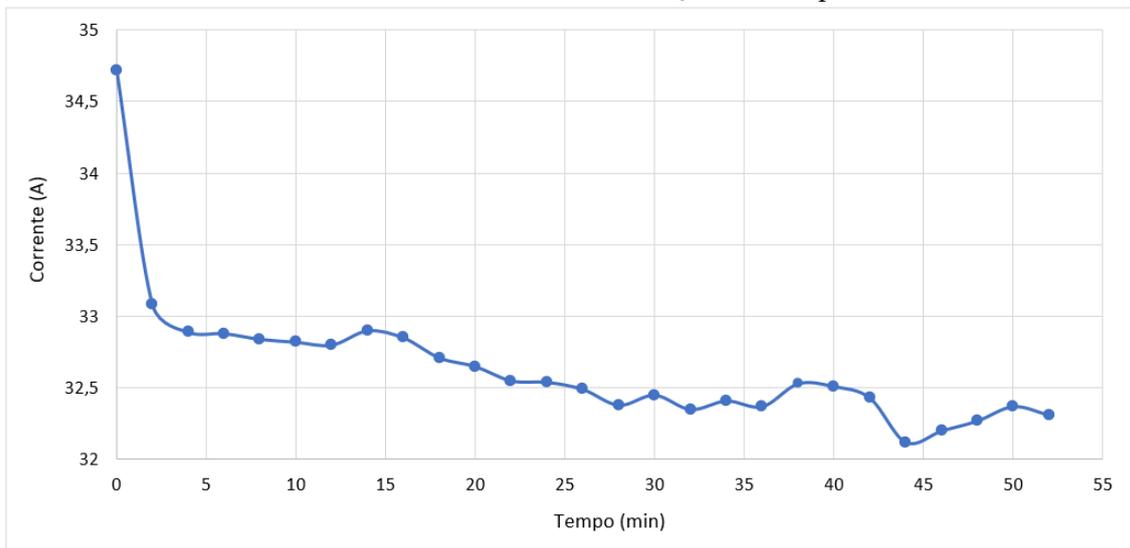
Gráfico 2 – Temperatura externa em função do tempo



Fonte: elaboração própria, 2023.

Nos testes de consumo, a corrente elétrica atinge o pico no início do aquecimento com 34,72 A e após 3 minutos variou entre 32 e 33 A até o fim do teste, de acordo com o Gráfico 3, resultando em uma potência maior que 7000 W.

Gráfico 3 – Corrente em função do tempo



Fonte: elaboração própria, 2023.

Na fundição de 5,4 kg de alumínio (2 L), levou-se entre 26 e 30 minutos, utilizando uma temperatura de 760 °C a partir da temperatura ambiente até o equilíbrio térmico do forno, metal e cadinho. Se fosse possível fundir sem o uso de um cadinho, seria necessário em torno de 15 minutos com a mesma potência para superaquecer o

alumínio por conta da massa de 4,6 kg do cadinho de grafite, que acaba absorvendo bastante calor no processo antes de entrar em equilíbrio térmico com o forno.

Para derreter o cobre, foi necessária a modificação do processo, pois 2 L de cobre equivalem a 17,92 kg, tornando-se inviável o manuseio; foi então empregado um volume menor. Outro problema apresentado é que a temperatura de pico atingida dentro da resistência elétrica é bem maior que a no termômetro interno, entre uma hora e meia a duas horas de uso contínuo, mantendo o ciclo de aquecimento em 1200 °C; acaba-se rompendo o arame por derretimento, estimado acima de 1500 °C em vários pontos simultaneamente, formando poças de metal que derretem até o tijolo refratário. Com a falha da resistência, gerando o derramamento de poças de metal no interior, é necessário preencher os furos causados com argamassa refratária e a troca da resistência. Levando-se isso em conta, foi fundida e vazada com sucesso uma barra de 4,48 kg (0,5 L) de cobre, no mesmo cadinho de 4,6 kg, modificando a temperatura alvo manualmente no controlador de temperatura, resfriando entre 1200 e 1150 °C e reaquecendo para 1200 °C até o derretimento do metal, em torno de 1 hora e 40 minutos.

Ao final dos testes, a resistência de liga FeCrAl A-1 apresentou baixa oxidação do fio e elasticidade pouco alterada em teste contínuo. A estrutura apresentou microfissuras próximas à fina camada de argamassa, mas, devido ao formato travado de trapézio de encaixe dos tijolos formando um decágono e a estrutura metálica externa, não houve movimentação ou vazamentos de gases lateralmente.

4 CONCLUSÃO

Para a fundição do alumínio, foram realizados vários testes de repetibilidade, e a estabilidade mostrou-se satisfatória. Enquanto o forno se prova viável para o uso contínuo na fundição de alumínio, no caso do cobre é necessário um volume menor e um tempo maior controlando a temperatura manualmente. Esse problema pode ser solucionado em um estudo futuro com o uso de um controlador de temperatura com mais funções.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. ABIFA. **Desempenho do setor de fundição**. São Paulo: ABIFA, 2023. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/wp-content/uploads/2014/06/03-BOLETIM-MAR%c3%87O-23.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2023.

ASM INTERNATIONAL, HANDBOOK COMMITTEE. **ASM Handbook**: properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials. 10. ed. Novelty: ASM International, 1990. 1328 p, v. 2.

BALDAM, Roquemar de Lima; VIEIRA, Estéfano Aparecido. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. 2. ed. São Paulo: Érica, 2014. 384 p.

BEELEY, Peter. **Foundry technology**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 719 p.

ÇENGEL, Yunos A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2012. 906 p.

JONES, Jenny M.; MASON, Patrick E.; WILLIAMS, Alan. A compilation of data on the radiant emissivity of some materials at high temperatures. **Journal Of The Energy Institute**, Leeds, v. 92, n. 3, p. 523-534, jun. 2019. Elsevier.

KANTHAL. **Resistance heating alloys for electric appliances**. Sweden: KANTHAL, 2019. Disponível em: https://www.kanthal.com/globalassets/kanthal-global/downloads/resistance-heating-alloys-for-electric-appliances-handbook_b_eng_lr.pdf. Acesso em: 25 jun. 2023.

KIMINAMI, Claudio Shyinti; CASTRO, Walman Benício de; OLIVEIRA, Marcelo Falcão de. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013. 236 p.

LESKO, Jim. **Design industrial: guia de materiais e fabricação**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2012. 350 p.

LUND, Herbert F. (ed.). **Recycling Handbook**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2000. 976 p.

MORGAN ADVANCED MATERIALS. **Cerablanket and Cerachem Blankets: product data sheet**. [Windsor]: MORGAN, 2021. Disponível em: https://www.morganthermalceramics.com/media/3993/cerablanket_cerchem-blankets_eng.pdf. Acesso em: 25 jun. 2023.

MORGAN ADVANCED MATERIALS. **JM® Insulating Firebrick Series: product data sheet**. [Windsor]: MORGAN, 2023. Disponível em: https://www.morganthermalceramics.com/media/9428/jm-ifb-series_eng.pdf. Acesso em: 25 jun. 2023.

PIERSON, Hugh O. **Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerenes: properties, processing and applications**. Park Ridge: Noyes Publications, 1993.

ROHSENOW, Warren M.; HARTNETT, James P.; CHO, Young I. (ed.). **Handbook of heat transfer**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1998.