

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM FORNO TIPO CADINHO UTILIZANDO QUEIMADOR ATMOSFÉRICO DE GLP PARA FUNDIÇÃO DE ALUMÍNIO COM FINS DIDÁTICOS

Theo Martins de Alencar Paiva ^[1] e Ramsés Otto Cunha Lima ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semiárido, Engenharia Mecânica; aluno; theo_martins_alencar@hotmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semiárido, Engenharia Mecânica; orientador; ramses.cunhalima@ufersa.edu.br

Resumo: A indústria brasileira, em diversos segmentos, utiliza a fundição para a fabricação dos mais diversos componentes, sobretudo para o setor automotivo, havendo assim a necessidade de estudos voltados ao desenvolvimento e aprimoramento de tal processo. Para o estudo da fundição, o primeiro aspecto a ser observado no início do processo de fabricação é a garantia de um forno que promova uma fusão adequada e controlada do material a ser fundido. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo o projeto e construção de um forno tipo cadinho que utilize queimador atmosférico de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) para a fundição de alumínio com fins didáticos. Para o seu desenvolvimento, o projeto foi dividido em três etapas: o dimensionamento de um queimador atmosférico de GLP; o dimensionamento do isolamento térmico com base em um modelo de condução radial e o desenvolvimento de um sistema de sensoramento de pressão e temperatura utilizando a plataforma Arduino® para determinar as características finais do forno. Como resultado da pesquisa, foi obtido um forno com temperatura média de trabalho de 750 °C, com uma potência total de 8 kW e eficiência de 37,5% quando em operação em sua pressão ótima de 25,5 kPa.

Palavras-chave: Fundição, Alumínio, Combustão, Queimador Atmosférico, Sensoriamento.

1. INTRODUÇÃO

No primeiro semestre de 2020, a indústria metalúrgica brasileira produziu uma quantidade de 966.889 toneladas de material fundido. Parte da produção (12,34%) é destinada para exportação, o que representa um valor bruto de 274 milhões de US\$ [1]. Considerando que o superávit da balança comercial brasileira no mesmo período foi de 23 bilhões de US\$, é notável o impacto e a importância desses produtos para a economia nacional, uma vez que representam 1,2% desse superávit, mesmo em um ano de crise global.

A produção de fundidos no território nacional concentra-se na região Sudeste, com destaque para os estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro. Diante do grande impacto econômico que a indústria da fundição possui e do déficit apresentado por esse setor nas regiões Norte e Nordeste, faz-se necessário, cada vez mais, estudos que possam viabilizar o desenvolvimento do segmento nesses locais [1].

Um dos maiores desafios do processo de fundição é garantir que o fundido esteja com o mínimo de contaminação possível. A etapa crucial para assegurar esta condição é justamente no processo de fundir o metal, uma vez que, em estado líquido, este é altamente reativo, principalmente em temperaturas de vazamento. Logo, para que se possa estudar a fundição é fundamental garantir um meio para fundir o metal que assegure um fundido com poucas inclusões provenientes de contaminação ambiental [2].

Na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), campus Mossoró, o curso de graduação em Engenharia Mecânica possui disciplinas em sua grade curricular que abrangem as técnicas da fundição. Porém,

no laboratório de processos de fabricação há somente um forno a carvão para as práticas de fundição. Mesmo sendo uma alternativa viável economicamente, fornos a carvão possuem muitas desvantagens diante do aspecto técnico da fundição, uma vez que alcançam baixa temperatura, possuem pouco controle de aquecimento e produzem grande quantidade de fuligem que geram inclusões no fundido, além do impacto ambiental da queima do carvão [3].

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um forno tipo cadinho para fundição de alumínio utilizando um queimador atmosférico de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). Seu principal uso se dará em aplicações didáticas para possibilitar o início de uma nova linha de pesquisa em fundição no curso de Engenharia Mecânica da UFERSA Mossoró.

Para alcançar o objetivo proposto, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre as tecnologias envolvidas no projeto de um forno desse tipo e dividiu-se o trabalho em três etapas: desenvolvimento do queimador; desenvolvimento do isolamento térmico e sensoriamento do forno.

1.2. Forno tipo cadinho

Os fornos tipo cadinho possuem aquecimento a combustíveis e podem apresentar temperaturas de 200 a 1400 °C [3], o que permite a fusão de diversas ligas de materiais não ferrosos, como o alumínio (660 °C) e o chumbo (327 °C). Os combustíveis para esse tipo de forno, por sua vez, podem ser líquidos (diesel), gasosos (GLP) ou sólidos (carvão, coque) [4].

Há ainda fornos tipo cadinho que utilizam aquecimento por indução magnética. Por não usar a queima de um combustível fóssil para promover a fusão do material, alguns autores, como [5] e [6], apontam esse método de aquecimento como vantajoso devido à sua eficiência. Porém, como argumenta [7], os gastos com eletricidade são muito elevados, o que pode encarecer o processo, além de que se a fonte dessa energia não for limpa, o impacto ambiental pode ser equivalente ao de combustíveis fósseis.

1.3. Queimadores atmosféricos

Queimador pode ser definido como um equipamento que permite a reação de combustão entre o combustível e o oxigênio de forma controlada e regulável [8]. Queimadores atmosféricos são dispositivos que trabalham com os gases de combustão parcialmente pré-misturados, nos quais o gás combustível é injetado sob pressão através de um bico injetor, que é uma restrição com um pequeno orifício. Ao passar pelo injetor, o gás acaba arrastando ar primário do ambiente, devido ao efeito conhecido como *entrainment*. Após esse arrasto, os dois gases entram em um tubo de Venturi, onde passam pela constrição e, em seguida, pela expansão, sendo misturados e seguindo para a câmara de combustão [9].

1.3.1. Componentes e dimensionamento de um queimador atmosférico

Os principais componentes e dimensões de um queimador atmosférico são mostrados na Figura 1.

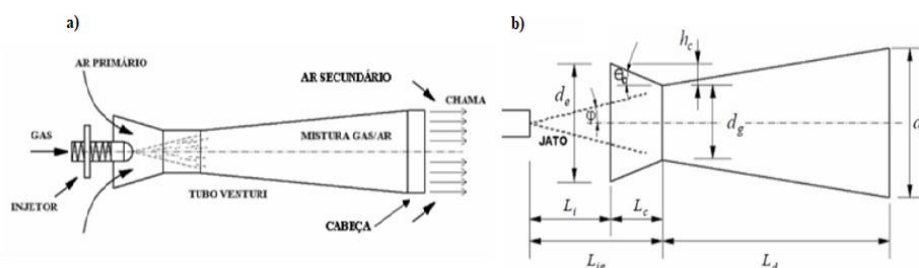


Figura 1 – Principais componentes de um queimador atmosférico. (Adaptado de [8])

Como mostrado na Figura 1a), um queimador atmosférico possui três principais componentes: o injetor, o Venturi e a cabeça, cada um deles tem as seguintes funções, segundo [8] e [9]:

- **Injetor:** dispositivo para injetar o combustível, fazendo-o expandir e gerar o arrasto do ar primário. Fisicamente, o injetor atua para converter a energia potencial do gás que está sob alta pressão em energia cinética, formando o jato de gás;

- **Venturi:** parte do queimador formado por uma constrição seguido de uma expansão, serve para homogeneizar a mistura de ar primário e gás combustível;

- **Cabeça:** parte do queimador onde ocorre a reação de combustão dos gases e a estabilização da chama.

A Figura 1b) exemplifica as dimensões a serem calculadas para um queimador atmosférico. O conjunto de Equações 1 a 7 traz todos os parâmetros para as dimensões do queimador a partir da metodologia proposta por [10] através de métodos teórico-experimentais e revisadas por [8], aplicando simulações computacionais para aproximar as considerações teóricas propostas anteriormente. A Tabela 1 traz a definição dos termos presentes nesse conjunto.

$$R = 1,3 \frac{\rho_{comb.}}{\rho_a} \left[\frac{d_g}{d_i} \left(\frac{\rho_m}{\rho_{comb.}} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (1)$$

$$R = 4,76nA \quad (2)$$

$$L_{ig} = 0,97d_g + 42 \quad (3)$$

$$L_d = [4 \leftrightarrow 7] d_g \quad (4)$$

$$L_c = [0,2 \leftrightarrow 0,3] L_{ig} \quad (5)$$

$$d_e = 2L_c \tan(\alpha_c) + d_g \quad (6)$$

$$d_{exp} = 2L_d \tan(\alpha_d) + d_g \quad (7)$$

Tabela 1 – Parâmetros do conjunto de Equações 1 a 7. (Autoria própria)

Parâmetro	Parâmetro
ρ_{comb} Densidade do combustível (kg/m ³)	L_{ig} Distância do injetor à garganta do Venturi (mm)
ρ_a Densidade do ar (kg/m ³)	L_d Comprimento do difusor (mm)
ρ_m Densidade da mistura ar/combustível (kg/m ³)	L_c Comprimento do bocal de entrada (mm)
d_g/d_i Diâmetro garganta / Diâmetro injetor (mm)	d_e Diâmetro do bocal de entrada (mm)
R Relação volumétrica ar/combustível	α_c Ângulo da convergência do Venturi (°)
A Quantidade de ar teórico (mol)	d_{exp} Diâmetro de expansão do difusor (mm)
n Parâmetro de aeração (razão do ar primário e teórico)	α_d Ângulo da expansão do Venturi (°)

Toda a metodologia de dimensionamento apresentada é baseada em modelos analítico-experimentais e

revisada através de métodos computacionais generalizados a partir de casos particulares. Os métodos analíticos de desenvolvimento possuem limitações de modelagem quanto à simplificação e idealização de modelos. Já modelos experimentais contam com a generalização de casos ensaiados e geram custos elevados [11]. Modelos baseados em métodos numéricos, por sua vez, equilibram os pontos positivos das demais, aproximando os modelos da realidade com um menor investimento comparado ao experimental [12].

O desenvolvimento de queimadores que utilizam combustíveis fósseis tem como grande desafio a questão do controle de emissões de gases nocivos ao meio ambiente. Diante dessa problemática, novos métodos de análise de queimadores utilizando simulações computacionais são desenvolvidos. Tais análises permitem a obtenção de dados tanto relacionados à dinâmica dos fluidos quanto sobre a reação das espécies que estão reagindo [13].

O uso dessa tecnologia no desenvolvimento de uma nova geração de fornos permite grandes avanços na eficiência e redução da emissão de poluentes, como relata [13], onde a modelagem do sistema de combustão no projeto de um forno permitiu um aumento de eficiência do equipamento para cerca de 80%, que representa uma melhora de 10 a 20% em comparação com outros fornos da mesma categoria (para tratamentos térmicos). A simulação de um queimador pode prever o comportamento fluidodinâmico com boa precisão, sem a necessidade de testes práticos que agregariam custos no desenvolvimento do equipamento [14].

1.4. Transferência de calor em um sistema radial

A equação que governa a condução de calor em estado permanente em um sistema radial composto por duas camadas de materiais com convecção nas paredes interna e externa é dada pela Equação (8), segundo [15].

$$q_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,3}}{\left[\frac{1}{2\pi r_1 L h_1} \right] + \left[\frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi k_a L} \right] + \left[\frac{\ln(r_3 / r_2)}{2\pi k_b L} \right] + \left[\frac{1}{2\pi r_3 L h_3} \right]} \quad (8)$$

Onde q_r é a potência térmica do sistema; $T_{\infty,1}$ e $T_{\infty,3}$ são as temperaturas do ar no interior e exterior do forno, respectivamente; L é o comprimento do forno; h_1 e h_3 são os coeficientes convectivos do interior e exterior do forno, respectivamente; k_a e k_b são a condutividade térmica do material a e material b e os valores de r_1 , r_2 e r_3 são os raios das paredes do sistema radial.

Logo, para dimensionar a espessura de uma das camadas, para uma dada potência térmica, de forma que o sistema fique com uma diferença de temperatura externa e interna desejada, basta conhecer os parâmetros de condutividade, os coeficientes convectivos dos materiais e o comprimento do sistema.

2. METODOLOGIA

O projeto e construção do forno se deu em três etapas: o desenvolvimento do queimador, do isolamento térmico e o do sistema de sensoramento. Após as etapas concluídas e o forno montado, foram realizados testes para determinar as características finais do equipamento, como as curvas de aquecimento, as temperaturas máxima e de trabalho, a pressão ótima de trabalho, além do tempo necessário para a fusão do material.

Na etapa do desenvolvimento do queimador, utilizou-se o método de dimensionamento proposto por [10] e revisado por [8]. Para a determinação de alguns parâmetros do queimador, como arrasto do ar primário, mistura das espécies e pressão de trabalho, foi utilizada a ferramenta de simulação *Computational Fluid Dynamics* (CFD) a fim de estudar a dinâmica dos fluidos em seu interior e otimizar sua operação.

Já na etapa do desenvolvimento do isolamento térmico, realizou-se um levantamento de materiais refratários

na literatura que pudessem ser aplicados a fornos ao qual o trabalho se propõe desenvolver. Posteriormente, foi realizada uma consulta no comércio local sobre a disponibilidade e preço desses materiais. Por fim, para o desenvolvimento do sensoramento do forno foi desenvolvido um sistema com sensores de temperatura e pressão utilizando a plataforma Arduino®.

2.1 Desenvolvimento do queimador atmosférico

Para o dimensionamento do queimador a partir do conjunto de Equações 1 a 7 é necessário definir os parâmetros de densidades, quantidade de ar teórico, parâmetro de aeração e relação volumétrica de ar e combustível. Todos esses são encontrados a partir da estequiometria de reação da combustão do GLP. Por fugir do escopo desse trabalho, todo o desenvolvimento das equações estequiométricas será considerado como apresentado em [16]. Os resultados encontrados por [16] para tais parâmetros são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros estequiométricos para o dimensionamento do queimador. (Adaptado de [16])

Variáveis	Resultados
Densidade do combustível	$\rho_{\text{comb}} = 2,44 \text{ kg/m}^3$
Densidade do ar	$\rho_a = 1,184 \text{ kg/m}^3$
Densidade da mistura	$\rho_m = 1,22 \text{ kg/m}^3$
Quantidade do ar teórico	$A = 5,75 \text{ mols}$
Parâmetro de Aeração	$n = 1$
Relação volumétrica de ar/combustível	$R = 27,37$

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros estequiométricos necessários para o dimensionamento do queimador. Com esses dados e o conjunto de equações 1 a 7 é possível definir suas dimensões. O outro parâmetro necessário para dimensionar o queimador é o diâmetro do bico injetor (d_i), o qual [10] recomenda valores que variam de 0,8 a 2,0 mm, a depender da pressão do queimador e da potência térmica do forno.

2.1.1 Simulação computacional

Para a otimização da queima foram realizadas simulações em CFD através do *solver* Fluent do *software* ANSYS®. O modelo simulado é uma simplificação em duas dimensões do queimador. Para as dimensões definidas foram simuladas diferentes pressões, variando de 12,5 a 25,5 kPa, faixa indicada por [10] para a potência térmica esperada para o forno, cerca de 8 kW, assim como os queimadores desenvolvidos por [16] e [17], que possuem uma faixa de operação semelhante à objetivada nesse trabalho.

Após a simulação, para cada mistura obtida, a partir de cada pressão simulada, foi calculada a temperatura adiabática de chama através da Equação 9 [17]. A partir disso foi possível determinar para qual mistura o queimador conseguiria atingir a temperatura desejada para a operação do forno.

$$H = [\sum N_i [\bar{h}_{f,i}^0 + \bar{C}_{p,i} (T_{ad} - T_{amb})]] \quad (9)$$

Na Equação 9, H é a entalpia da reação, igual para reagentes e produtos; N_i o número de mols de cada componente; $\bar{h}_{f,i}^0$ a entalpia de formação de cada componente; $\bar{C}_{p,i}$ o calor específico a pressão constante de cada componente; T_{ad} a temperatura adiabática de chama e T_{amb} a temperatura ambiente.

Para a otimização não foi levado em consideração que o queimador opera com a combustão a uma razão

de mistura acima da estequiométrica (razão mássica de ar/combustível de 3,6), uma vez que como descreve [17], o objetivo do projeto de um forno que utiliza combustível é garantir a operação com o menor custo de gás.

O processo de otimização foi realizado da seguinte maneira: após a realização das simulações, a temperatura adiabática de chama para cada mistura obtida com a variação de pressão foi calculada para assegurar que a temperatura de vazamento do alumínio (750 °C [2]) fosse atingida. Posteriormente, foram conduzidos experimentos para analisar o tempo de fundição e o gasto de combustível para cada pressão, com isso foi determinada a pressão ótima de trabalho para o forno, garantindo economia de gás, tempo e emissão de poluentes. Os experimentos foram realizados fundindo uma massa conhecida de alumínio (300 g) com o monitoramento da pressão e das temperaturas do fundido e do interior do forno.

2.2 Desenvolvimento do isolamento térmico

O desenvolvimento do isolamento térmico do forno se deu em três etapas, sendo elas a escolha do material isolante, com base na literatura consultada [18] e [5] e posteriormente uma pesquisa de mercado para realizar um levantamento dos materiais disponíveis; realização de experimentos com a finalidade de determinar a condutividade térmica do isolante e o dimensionamento do isolamento a partir da Equação 8.

Para viabilizar a construção do forno seguindo a proposta de baixo custo do projeto, apenas o mercado local foi consultado no levantamento, uma vez que após consulta prévia, constatou-se que o custo de frete para a região é elevado. A necessidade da realização dos experimentos para determinar a condutividade térmica do material se deu devido à falta de especificação técnica do fabricante de material isolante disponível no comércio local. Como solução para este impedimento, foi desenvolvido um equipamento para determinar condutividade térmica do material isolante disponível.

O único material disponível na região de desenvolvimento do trabalho foi a massa refratária. Para determinar a sua condutividade térmica foi realizado o experimento mostrado na Figura 2, no qual o sistema de aquisição de dados de temperatura através de termopares tipo K ligados a um Arduino Uno registram a diferença de temperatura entre os sensores devido ao aquecimento de uma resistência elétrica no centro do corpo de prova.

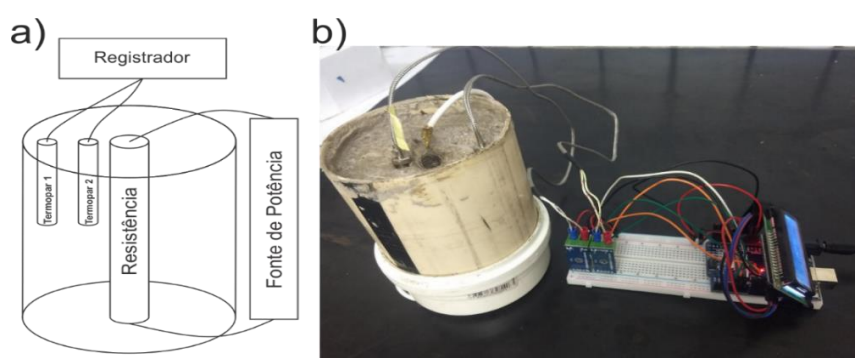


Figura 2 – Experimento de condutividade térmica. (Autoria Própria)

Na Figura 2a) está representado o esquema do experimento de condutividade, no qual, com os dados de temperatura registrados, das dimensões do corpo de prova e da potência dissipada pela resistência, é possível determinar a condutividade térmica do material através da Equação 10 [15]. A Figura 2b) apresenta o experimento realizado, onde foi confeccionado um corpo de prova seguindo a proporção de massa refratária e cimento indicada pelo fabricante (20% massa e 80 % cimento) com 100 mm de diâmetro e 180 mm de comprimento e os sensores foram postos a 25 e 11 mm do centro.

$$k = \frac{Q \cdot \ln(r_e/r_i)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_e - T_i)} \quad (10)$$

Na Equação 10, k é a condutividade térmica [W/m°C]; Q é a potência dissipada [W]; r_e e r_i são os raios da posição dos sensores [m] 1 e 2, respectivamente; L [m] é o comprimento do corpo de prova e T_e e T_i são as temperaturas registradas [°C] pelos sensores 1 e 2, respectivamente.

Para o corpo do forno, assim como [5], optou-se por um cilindro de gás refrigerante vazio, pela facilidade de acesso e pela geometria que permite reduzir o sistema térmico do forno a um radial.

Após a determinação da condutividade térmica da massa refratária é possível, através da Equação 8, determinar a espessura do isolamento térmico do forno, pois como demonstrado na seção 1.4, para uma certa potência térmica e diferença de temperaturas, apenas os parâmetros de condutividade e coeficientes convectivos dos materiais e o comprimento do sistema são necessários para que seja determinada a espessura de uma das camadas de um sistema radial. Todos esses parâmetros são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de condutividade e coeficientes de convecção. (Adaptado de [5])

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
h_{int}	100 W/m²K	$K_b(\text{aço})$	52,9 W/mK
h_{ext}	10W/m²K		

Na Tabela 3, os valores dos coeficientes convectivos são considerados para o ar na temperatura interna e externa do forno, respectivamente. A condutividade térmica do aço é assumida como constante.

A potência térmica utilizada para o dimensionamento do isolamento foi de 8 kW, assim como para o dimensionamento do queimador. A diferença de temperaturas projetada foi considerada com base nas temperaturas de vazamento do alumínio, pois é a temperatura de trabalho esperada para o forno, aproximadamente 750 °C, e a temperatura que segundo a ABNT NBR 13970:1971 não apresenta risco de queimaduras com o contato direto por 1 s, 71 °C [5].

2.3 Sistema de sensoriamento

O sistema de sensoriamento desenvolvido é composto por dois termopares tipo K e um transdutor de pressão. Na Figura 3 são apresentados os sensores utilizados no trabalho.

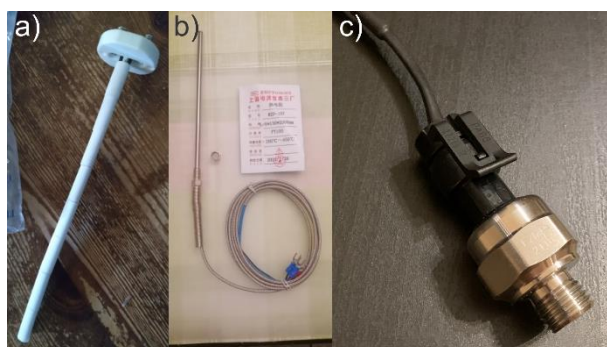


Figura 3 – Sensores utilizados no projeto de sensoriamento do forno. (Autoria própria)

O primeiro termopar, Figura 3a), que conta com um revestimento cerâmico, foi posicionado no interior do forno para registrar a temperatura interna. O segundo sensor de temperatura, Figura 3b), revestido por aço inox, foi posicionado no interior do cadinho para medir a temperatura do fundido. O transdutor de pressão,

Figura 3c), foi conectado à linha de gás que fornece o combustível, registrando a pressão de injeção do queimador. Todos os sensores foram ligados a um microcontrolador Arduino®, de maneira a registrar os dados em uma planilha automatizada no *software* Excel® através de uma interface Excel-Arduino.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Montagem final

A Figura 4 apresenta todo o sistema utilizado para a montagem do forno.



Figura 4 – Sistema da montagem final do forno. (Autoria própria)

De acordo com a Figura 4, os componentes utilizados para a montagem do forno foram o queimador (a), o forno (b), a válvula corta-chama (c), o sensor de pressão (d), o regulador de pressão (e) e o cadinho (f). O queimador e o forno possuem as dimensões descritas nos subtópicos posteriores. A válvula corta-chama atua de forma a impedir o retorno da frente de chama à montante do escoamento do gás. O sensor de pressão é conectado a uma derivação em “T” na linha de gás com a finalidade de medir a pressão de operação do queimador. O regulador de pressão permite a regulação da pressão de injeção sem débitos consideráveis à vazão, possibilitando um melhor ajuste do fluxo de gás. Por fim, o cadinho utilizado para a fusão do alumínio é confeccionado em aço carbono de baixa liga.

3.2 Dimensões e otimização do queimador

Utilizando um injetor com diâmetro $d_i = 0,8$ mm, para a faixa de potência térmica de 5 a 8 kW, potência térmica usual para um forno com fim semelhante ao desenvolvido, assim como [5] e [17], como indicado por [10] e os parâmetros da Tabela 2, todas as dimensões do queimador podem ser definidas e são apresentadas na Figura 5.

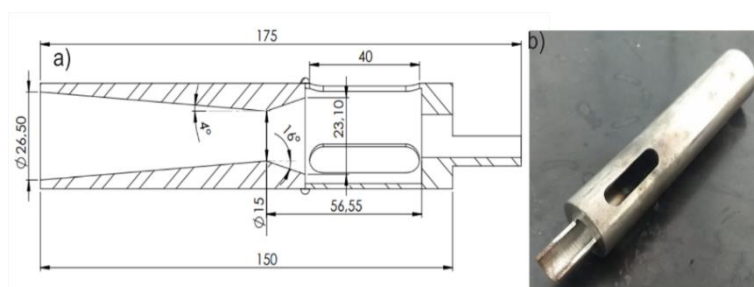


Figura 5 – Modelo e Peça finalizada. (Autoria própria)

Na Figura 5a) todas as dimensões do queimador são apresentadas e a Figura 5b) apresenta a peça

finalizada. Para ter apoio para posicionar o injetor, foi adicionado um suporte na parte posterior do queimador, o que proporcionou uma maior praticidade na montagem do equipamento.

Para a simulação, a malha gerada para o modelo computacional apresentou 68.518 nós e 67.653 elementos. Por se tratar de um modelo simples, optou-se por uma malha não estruturada, levando em conta a métrica de qualidade *skewness* (uma medida da deformação da malha), que [19] recomenda variar entre 0 e 0,25 para uma qualidade de células excelente. A métrica adotada alcançou uma média de 0,0125 com desvio padrão de 0,0360, o que está dentro do intervalo de qualidade excelente de células segundo [19].

O modelo simulado é apresentado na Figura 6, que traz as condições de contorno utilizadas para simular o problema em CFD.

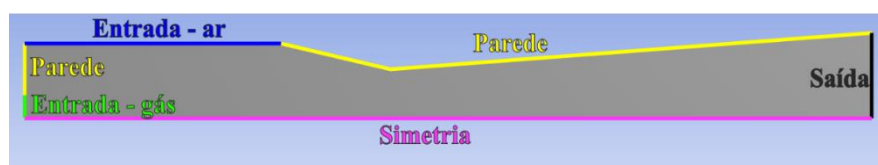


Figura 6 – Modelo e condições de contorno simulados. (Autoria própria)

Na Figura 6 é apresentado todo o modelo simulado. Na condição de contorno entrada – gás foi configurada como uma entrada de pressão, na qual somente gás combustível é injetado, com valores variando na faixa indicada por [10] em intervalos de 3 kPa. A entrada - ar, também entrada de pressão, em que somente ar entrará. A saída foi considerada um *outlet* sem diferença de pressão. A linha de simetria representa o eixo no qual a simulação é considerada axissimétrica.

Para a simulação foi utilizado o modelo de transporte de espécies, onde uma espécie é o gás combustível, adotado como uma mistura 50% butano e 50% propano e a outra o ar atmosférico, com 23% de Oxigênio e 77% de Nitrogênio. Para simulação da turbulência foi adotado um sistema de duas equações, κ - ϵ , que como mostram os resultados obtidos por [20] e [21], possuem uma boa aproximação para problemas similares.

Na Figura 7 são apresentados os resultados da simulação e o gradiente de pressão no interior do queimador.

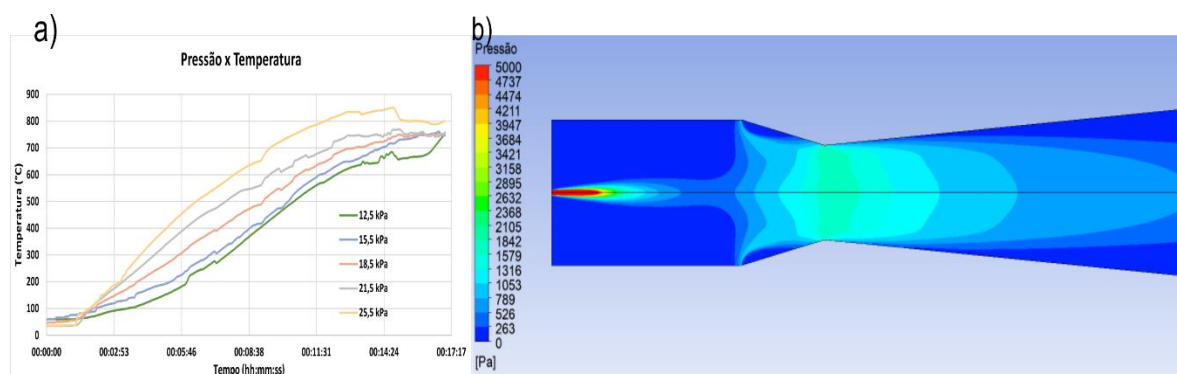


Figura 7 – Resultados das simulações e gradiente de pressão. (Autoria própria)

De acordo com os resultados da Figura 7a), onde são apresentados os valores médios da razão mássica ar/combustível em função do comprimento do queimador para diferentes pressões, com o aumento da pressão de injeção, menor a relação ar/combustível, isto é, mais próximo da razão estequiométrica.

É notória a diminuição na variação da relação com o aumento da pressão pois mesmo com incrementos iguais de pressão, os valores de ar/combustível não apresentam uma variação também constante. Este fato se deve à limitação que o efeito do *entrainment* possui para um queimador atmosférico. Como aponta [10], um queimador deste tipo consegue arrastar apenas cerca de 60% do ar estequiométrico. Para este projeto esse valor

corresponderia a uma relação ar/combustível de cerca de 5,8. Diante dessa limitação, é possível notar que o queimador, para 25,5 kPa, opera próximo a esse limite, com uma relação de 6,6.

Na Figura 7b), o valor máximo do gradiente de pressão foi limitado a 5,0 kPa, apenas com a finalidade de demonstrar as diferenças de pressão causadas pelo Venturi e o gradiente de pressão ao longo do difusor, o que acarreta na homogeneização da mistura.

De acordo com os resultados das misturas obtidas com a variação de pressão (Figura 7a)) e a Equação 9, é possível assegurar que todas as misturas garantem a obtenção da temperatura objetivada no projeto (750 °C), uma vez que a relação mais pobre, 8,1 para a pressão de injeção de 12,5 kPa, garante uma temperatura adiabática de chama de 1.140 °C. Assim como o queimador desenvolvido por [17], a obtenção de temperaturas acima de 600 °C é possível mesmo com baixas pressões de injeção.

Na Figura 8 são apresentados os resultados experimentais de aquecimento do forno e as análises de vazão de gás para cada pressão de operação, com estimativa de tempo total de consumo de um botijão de gás P13.

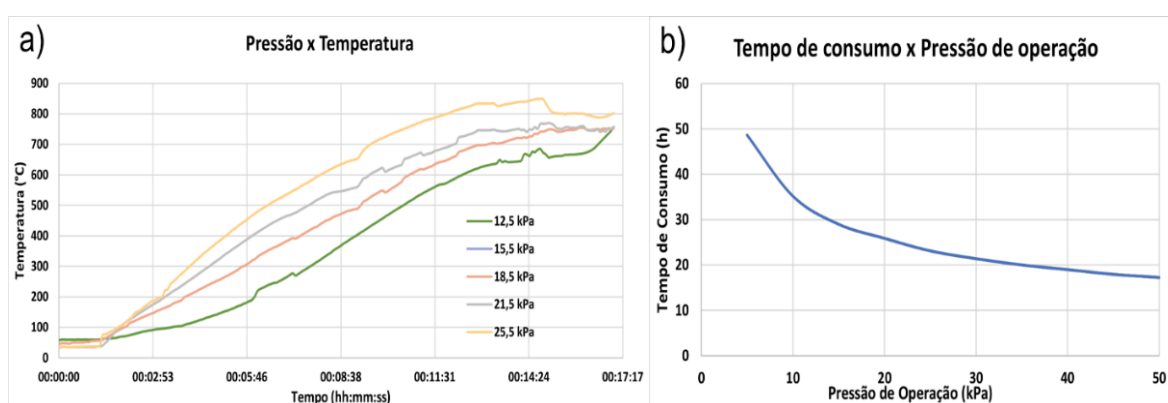


Figura 8 – Experimento de aquecimento do forno e tempo de consumo de gás. (Autoria própria)

Na Figura 8a) são apresentados os resultados de aquecimento do forno para 5 pressões de operação. Os dados de temperatura são resultantes do termopar posicionado junto do fundido, haja vista que para a otimização do queimador com a finalidade da fundição, a temperatura do fundido é mais relevante para o estudo. Na Figura 8b) são mostrados os tempos necessários para o consumo de um botijão P13 para cada pressão de operação do forno.

Diante dos resultados apresentados na Figura 8a), é notável a influência da pressão no tempo de fundição da massa de alumínio, sendo a pressão mais alta (25,5 kPa) a que atingiu a temperatura de 750 °C mais rapidamente, em cerca de 10:35 min. Na Figura 8b) é mostrado que, para essa pressão, o tempo de consumo é de aproximadamente 23 h.

Assim como no trabalho desenvolvido por [17], a pressão de 25,5 kPa também será considerada a ótima, uma vez que promove o aquecimento do material em menos tempo e apresenta uma economia considerável de gás já que a pressão analisada anteriormente apresenta um tempo de fundição de aproximadamente 14:40 min e um tempo de consumo de 25 h. A pressão de 25,5 kPa ainda apresenta uma vantagem quanto a economia devido seu menor tempo de fundição, sendo cerca de 24% mais econômico que a pressão de 18,5 kPa, levando-se em consideração o consumo total de um botijão P13.

Para essa pressão de injeção, a potência térmica do queimador é de 8 kW, conforme o diagrama para o cálculo do injetor de gás reproduzido por [10]. Ainda de acordo com os resultados da Figura 8a), a potência útil do forno é de 3 kW, representando 37,5% de eficiência.

3.3 Dimensionamento do isolamento

Após a realização dos ensaios de condutividade, obteve-se um valor de k de 1,43 W/m.K para a massa refratária. Com esse resultado e os valores dos parâmetros apresentados na Tabela 3, é possível determinar, através da Equação 8, uma espessura de isolante de 57 mm. Os resultados da determinação da condutividade térmica da massa refratária e do dimensionamento do isolamento são mostrados na Figura 9.

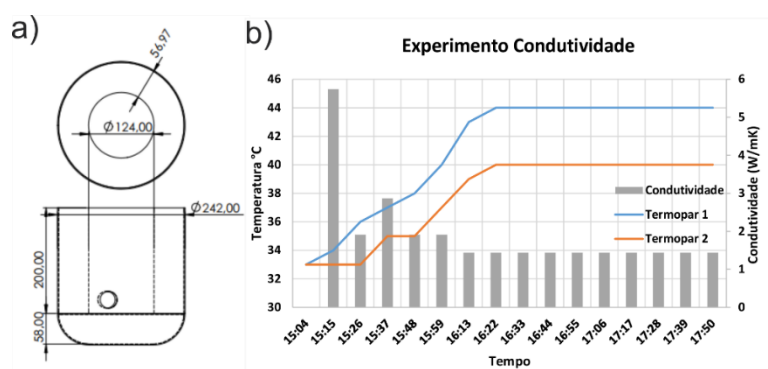


Figura 9 – Resultados de condutividade e isolamento térmico. (Autoria própria)

Na Figura 9a) é apresentado um desenho esquemático do isolamento térmico do forno, onde a capacidade máxima para o cadinho em seu interior é de cerca de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Na Figura 9b), os resultados apresentados em conjunto com as dimensões do experimento da Figura 2 resultam no valor de 1,43 W/m.K para a condutividade da massa refratária, valor que se aproxima do material refratário utilizado por [5] (1,22 W/m.K).

4. CONCLUSÃO

O projeto e desenvolvimento do forno para a fundição de alumínio com fins didáticos obteve êxito em seu objetivo, considerando que foi desenvolvido um equipamento capaz de fundir alumínio e monitorar os valores de temperatura e pressão do gás injetado ao longo do processo. Além disso, a potência final do forno está condizente com os fornos com finalidades semelhantes desenvolvidos por outros autores, dentre eles [5] e [17].

Os principais resultados obtidos no desenvolvimento desse projeto são satisfatórios e refletem o esperado conforme as literaturas consultadas [5] e [17], uma vez que foi obtido um forno com temperatura média de trabalho de 750 $^{\circ}\text{C}$, potência total de 8 kW e eficiência de 37,5% quando em operação em sua pressão ótima de 25,5 kPa. Além disso, a espessura do isolamento dimensionado foi de 57 mm, permitindo o uso de cadinhos de até 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Ao fim do projeto, o custo total foi de aproximadamente 350 R\$.

Mesmo alcançando os objetivos propostos, pode-se citar sugestões para a melhoria do dispositivo desenvolvido, dentre elas um estudo de controlabilidade da temperatura do queimador conforme [17], o qual promove outras finalidades para o forno, a exemplo dos tratamentos térmicos. Além disso, sugere-se também um estudo mais detalhado dos materiais isolantes, o qual não foi possível em decorrência da falta de opção no comércio local e o alto custo de fretes. O estudo de tais aspectos abre diversas possibilidades de trabalhos futuros para a construção de um forno otimizado para a fundição de alumínio ou até mesmo outro processo, como tratamentos térmicos de ligas ferrosas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABIFA. Associação Brasileira das Indústrias de Fundição. Desempenho do setor de fundição – Outubro/2020. Disponível em: <<http://www.abifa.org.br>>. Acesso em: 10 nov. 2021.
- [2] CAMPBELL, J. Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design. 2 Ed. Oxford: Elsevier Ltda., 2015.
- [3] CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica: Processo de Fabricação e Tratamento, São Paulo-SP, Vol.2, McGraw-Hill, 1977.
- [4] BALDAN, R. de L.; VIEIRA, E. A. Fundição: processos e tecnologias correlatas. 1. ed. São Paulo: Erica, 2013.
- [5] PERATELLO, R. Construção de um forno do tipo cadinho para fusão de ligas de alumínio. 2018. 69p. Projeto de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.
- [6] MATTE, C. R. et al. Análise e otimização de um pequeno forno de fundição. Anais da engenharia de produção / ISSN 2594-4657, [S.l.], v. 2, n. 1, p. 35 - 58, jul. 2018. ISSN 2594-4657. Disponível em: <<https://uceff.edu.br/anais/index.php/engprod/article/view/198>>. Acesso em: 10 nov. 2021.
- [7] ANDRADE, M. G; Eficiência energética em fundições: uma revisão bibliográfica e um estudo de caso para uma fundição brasileira. 2016. 52p. Projeto de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Aranguá, 2016.
- [8] IBAÑEZ, W. A. C. Análise e desenvolvimento de uma metodologia de projeto de queimadores atmosféricos tipo tubo perfurado. 154 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- [9] JONES, H. R. N. The applications of combustion principles to domestic gas burner design. 6 ed. Londres: Taylor & Francis e-Library, 2005.
- [10] SALVI, G. La Combustion – Teoria y Aplicaciones. Madrid: Dossat S.A., 1995.
- [11] SOUSA, C. H. Métodos numéricos aplicados à engenharia: uma abordagem conceitual e proposta de empregabilidade de metodologia ativa de ensino. In: XVI simpósio de excelência em gestão e tecnologia, 16., 2019, Resende. Proceedings XVI SEGeT. Resende: Aedb, 2019. p. 20-37.
- [12] SILVA, C. V. et al. 3D Analysis of turbulent non-premixed combustion of natural gas in a horizontal cylindrical chamber. in: brazilian congress of mechanical engineering, 22., 2013, Ribeirão Preto. Proceedings of COBEM 2013. Ribeirão Preto: Abcm, 2013. v. 22, p. 24-34.
- [13] DANIELSSON, Ö. Simulation assists in developing efficient and environmentally friendly recuperative burners used in heat-treating applications. Ansys Advantage, Delaware, v. 1, n. 1, p. 26-26, out. 2007.
- [14] NOOR, M. M.; WANDEL, A. P.; YUSAF, T. F. Detail guide for cfd on the simulation of biogas combustion in bluff-body mild burner. In: second international conference on mechanical engineering research, 2., 2013, Malang. Proceedings of Second International Conference on Mechanical Engineering Research 2013. Malang: Brawijaya University, 2013. p. 24-57.
- [15] INCROPERA, F. P. et al. Fundamentos de transferência de calor e massa. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- [16] RAMOS, J. P. A.; Projeto de um queimador para forno de cadinho utilizando gásliquefeito de petróleo (GLP). 2017. 62p. Projeto de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.
- [17] MARZOLA, M. G; Eficiência energética em fundições: uma revisão bibliográfica e um estudo de caso para uma fundição brasileira. 2016. 52p. Projeto de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Aranguá, 2016.
- [18] CASOTTI, B.; FILHO, E.; CASTRO, P. Indústria de Fundição: situação atual e perspectivas. Rio de Janeiro, BNDS Setorial, n. 33, Mar. 2011, p. 121-162. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1721>>. Acesso em: 10 nov. 2021.
- [19] ANSYS. ANSYS Fluent theory guide. [s. l]: Ansys, 2016.
- [20] YUAN, G. ; ZHANG, L. ; ZHANG, H. ; WANG, Z. "Numerical and experimental investigation of performance of the liquid-gas and liquid jet pumps in desalination systems" Desalination, August 2, 2011, Vol.276(1-3), p.89
- [21] ZHOU, H. ; YANG, Y. ; WANG, L. Numerical investigation of gas-particle flow in the primary air pipe of a low NOx swirl burner – The DEM-CFD method Particuology, April 2015, Vol.19, pp.133-140