

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO DE ENTRADA DE LINGOTES E DE RETORNO  
DE FUNDIÇÃO DE ALUMÍNIO NO PROCESSO DE FUSÃO DE UM FORNO DE FUSÃO TIPO  
SOLEIRA SECA.

por

Rafael Santos Netto Matias

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro 2017



ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO DE ENTRADA DE LINGOTES E DE RETORNO  
DE FUNDIÇÃO DE ALUMÍNIO NO PROCESSO DE FUSÃO DE UM FORNO DE FUSÃO TIPO  
SOLEIRA SECA.

por

Rafael Santos Netto Matias

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Volnei Borges

M.Eng. Isaiás Mortari Machado

Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula

Porto Alegre, Dezembro 2017

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família pelo apoio dado durante todo o desenvolvimento do trabalho, em especial à minha mãe Maria Elizabeth que me apoiou nos momentos de estudo em casa e à minha tia Maria Cecília, que me ajudou revisando o trabalho. Agradeço também à minha namorada Victoria por todo o apoio dado. Agradeço também ao Eduardo Porto por todas as orientações dadas ao longo do curso. À minha professora orientadora, Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi, sempre muito prestativa e responsável direta pela realização deste trabalho. À todos os colegas de trabalho: forneiros (em especial ao Alessandro, Evandro, Danilo e Rafael), eletrônicos (em especial ao Anderson), analistas, supervisores, gerentes e demais colegas que me apoiaram ao longo do desenvolvimento do trabalho. Ao Adrian que é o meu mentor na área. À UFRGS, em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica e seus professores pelos conhecimentos ensinados e experiências trocadas. Aos colegas e amigos pelos diversos momentos de amizade e estudo.

MATIAS, R. S. N. **Análise da influência da condição de entrada de lingotes e de retorno de fundição de alumínio no processo de fusão de um forno de fusão tipo soleira seca.** 2017. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

## **RESUMO**

A gênese do processo de fabricação de peças por fundição sob pressão se dá nos fornos de fusão, que representam considerável parte dos custos de produção neste tipo de indústria. É proposta, neste trabalho, uma análise da influência de diferentes condições de entrada de lingotes e de retorno de fundição em um forno tipo soleira seca sobre o consumo de combustível e os custos associados. Foi realizada a caracterização experimental do processo de fusão de alumínio sob diferentes condições de carregamento em um forno de fusão tipo soleira seca e realizado um balanço energético do forno, permitindo a análise da influência dos diferentes tipos de carregamento. O modelo validado foi utilizado para estudar a influência da temperatura do alumínio alimentado sobre o consumo de combustível. Encontrou-se como resultado que a utilização de lingotes cortados e de galhos no carregamento favorece o melhor aproveitamento da energia, que existe um potencial significativo de redução de consumo ao utilizar lingotes cortados no carregamento do forno e que existe um potencial de redução de 33% da energia necessária para fundir e aquecer o alumínio para cada 100°C de variação de temperatura de entrada do material a alimentar no forno, o que corresponde à uma redução de consumo de combustível de 5% a 7%.

**PALAVRAS-CHAVE:** (Forno de fusão tipo soleira seca em fundição de alumínio, Balanço de energia em forno de fusão e Redução de custos na fundição de alumínio)

MATIAS, R. S. N. **Influence analysis of the entrance condition of ingots and die casting aluminum returns in the melting process of a shaft melting furnace.** 2017. 20 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

## **ABSTRACT**

The origin of the die casting manufacturing process takes place in the melting furnaces, which represent a considerable part of the production costs in this type of industry. It is proposed in this work an influence analysis of different ingot and die casting return entrance conditions in a shaft furnace about the fuel consumption and associated costs. An experimental characterization of the aluminum melting process under different loading conditions in a shaft melting furnace has been made and an energy balance of the furnace has been created, allowing the influence analysis of different loading types. The validated model was used to study the temperature influence of the fed aluminum on the fuel consumption. It has been concluded that the use of smaller ingots and die casting returns in the loading favors the best use of energy, that there is a significant potential of fuel consumption reduction using smaller ingots and that there is a potential of reduction of 33% of the energy to melt and heat the aluminium for every 100°C increase of the inlet temperature of the material entering the furnace, which corresponds to a fuel consumption reduction of 5% to 7%.

**KEYWORDS:** (Shaft melting furnace in die casting industry, Melting furnace energy balance and Die casting industry cost reduction)

## ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3. OBJETIVOS .....	2
3.1. Objetivo Geral.....	2
3.2. Objetivos Específicos.....	2
4. CARACTERIZAÇÃO DE PROCESSO DE FUSÃO EM FORNO TIPO SOLEIRA SECA..	3
4.1. Forno de Fusão.....	3
4.2. Material Utilizado.....	3
4.3. Parâmetros de Processo.....	4
5. BALANÇO ENERGÉTICO DE FORNO DE FUSÃO EM REGIME DE OPERAÇÃO.....	5
5.1. Balanço Energético de Volume de Controle em Regime Permanente.....	5
5.2. Transferência de Calor na Combustão dos Queimadores.....	6
5.3. Transferência de Calor para o Alumínio.....	6
5.4. Transferência de Calor para os Gases.....	6
5.5. Transferência de Calor para as Paredes do Forno.....	6
6. METODOLOGIA.....	7
6.1. Instrumentos de Medição.....	7
6.2. Descrição dos Experimentos.....	7
6.2.1. Experimento 1 - Carregamento com lingotes comuns.....	8
6.2.2. Experimento 2 - Carregamento com lingotes comuns e retorno de fundição.....	8
6.2.3. Experimento 3 - Carregamento com lingotes cortados.....	8
6.2.4. Experimento 4 - Carregamento com lingotes cortados e retorno de fundição.....	9
6.3. Aplicação do Balanço de Energia.....	9
6.3.1. Temperatura de Saída dos Gases de Exaustão.....	9
6.3.2. Normalização da Vazão Volumétrica.....	9
6.3.3. Vazão Volumétrica de Ar.....	10
6.3.4. Cálculo das Vazões Mássicas.....	10
6.3.5. Transferência de Calor pelas Paredes.....	10
6.4. Comparação de Resultados Experimentais e Teóricos.....	10
6.5. Análise Teórica da Variação da Temperatura de Entrada dos Materiais.....	10
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	11
7.1. Resultados Experimentais.....	11
7.2. Resultados do Balanço Energético.....	12

7.3. Resultados da Análise Teórica da Variação da Temperatura de Entrada dos	
Materiais.....	13
8. CONCLUSÕES.....	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
Anexo I .....	16
Apêndice I .....	17
Apêndice II .....	17
Apêndice III .....	18
Apêndice IV.....	18



## 1. INTRODUÇÃO

O processo de fabricação de peças por fundição de ligas de alumínio é comum em muitas indústrias no mundo. Ao longo dos anos diversas tecnologias foram desenvolvidas para a realização do processo, buscando a redução de perdas e o aumento da produtividade. A gênese da fundição se dá nos fornos de fusão, onde o metal em estado sólido é fundido, pronto para ser tratado e transportado. Dias, 2013, evidencia que na indústria de fundição o processo de fusão assume mais da metade do consumo geral de energia. Há diversos tipos de fornos de fusão de alumínio, cada um utilizado em diferentes aplicações. Os modelos mais comuns são os fornos revérberos, fornos de cadinho, fornos de indução e fornos soleira seca.

Este trabalho aborda uma análise de um forno de fusão de ligas de alumínio do tipo soleira seca, popularmente conhecido como forno torre, que utiliza gás natural como combustível. Este tipo de forno é comum em fundições dos mais diversos tipos no Brasil e no mundo. Há diferentes modelos de fornos soleira seca, mas todos seguem o mesmo princípio: os gases quentes provenientes dos queimadores são utilizados para pré-aquecer o material a ser fundido. Estes fornos têm a capacidade de trabalhar as zonas de fusão e de manutenção de maneira independente, característica que se adapta ao processo de produção de fundições, visto que a necessidade de metal líquido das máquinas produtivas varia de acordo com sua programação de produção. É possível trabalhar com máxima capacidade de fusão, caso a fábrica demande muito material, ou apenas com a função de manutenção do banho de alumínio, na hipótese de a produção ser interrompida por qualquer motivo. O banho de alumínio funciona como um pulmão para estas variações de demanda de alumínio inerentes à produção. É importante destacar que é possível manter sempre material pré-aquecendo dentro da torre do forno devido a este funcionamento independente, com o objetivo de maximizar o aproveitamento do calor residual. A Figura 1.1 mostra dois modelos típicos de fornos de fusão tipo soleira seca. Ambos podem ser fabricados com diferentes capacidades de fusão e de manutenção.

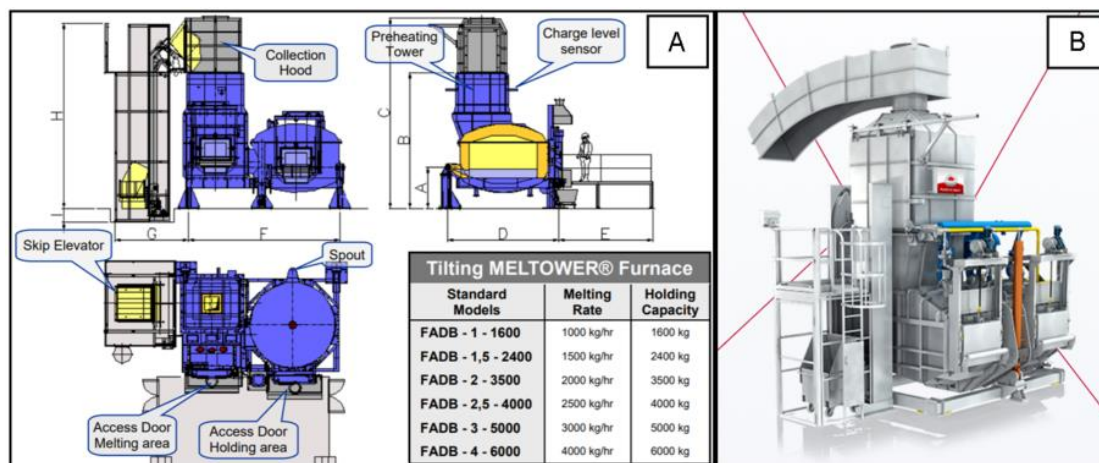


Figura 1.1: Exemplos de fornos de fusão de alumínio tipo soleira seca. A) Forno da marca Insertec com câmara de manutenção circular (Insertec, 2009). B) Forno da marca StrikoWestofen com projeto compacto e retangular (StrikoWestofen, 2017).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com StrikoWestofen, 2017, a geometria da torre e o projeto de queimadores permite a combinação de pré-aquecimento, fusão e manutenção no mesmo forno. O contra fluxo de material e de gases de exaustão na torre gera um aproveitamento eficiente do calor contido nos gases de exaustão. Com isso, o consumo de combustível e as perdas metálicas são reduzidos. O material fundido é transferido para a zona de manutenção com pouca turbulência e com pequena geração de óxidos. Como o controle do banho de alumínio líquido é

independente do processo de fusão, é possível manter o material líquido mais homogêneo e com temperatura aproximadamente uniforme. Complementarmente, Inserterc, 2009, explicita a reduzida formação de óxidos na zona de fusão devido à utilização de chama direta durante a fusão do material, pois a exposição do alumínio à alta temperatura se dá por tempo mínimo. Chandar e Ray, 2005, em sua revisão sobre transferência de calor em chamas diretas demonstram que a utilização deste tipo de chama em fornos industriais aumenta significativamente a transferência de calor por convecção ao material a ser fundido, melhorando a produtividade e reduzindo o consumo de combustível e a emissão de poluentes.

Malphol e Hillen, 2010, demonstram que de toda energia disponível para aquecer, fundir e superaquecer ligas de alumínio puro, 58% é consumida somente na etapa de aquecimento. Com isso, é destacada a importância de esforço para aprimorar esta etapa em busca de redução de consumo de combustível neste tipo de equipamento. A análise continua de maneira mais específica em fornos tipo torre, onde é evidenciada a relevância da alta densidade no empacotamento de material, em busca de uma zona de fusão com alta densidade de energia, uma zona “morna” de pré-aquecimento na torre e uma zona “fria” de entrada de material. Complementarmente, Kennedy, 2013, enfatiza que a maior parcela da perda de calor de um forno se dá pela chaminé, representando 62,5% do calor total disponível. Ao longo de sua análise, apresenta alternativas para recuperar parte deste calor perdido pela chaminé, como o uso de trocadores de calor para aquecer água para a planta, queimadores regenerativos ou recuperativos para pré-aquecer o ar de combustão, pré-aquecedores de sucata rotativos e pré-aquecedores de lingotes.

Ilustrando uma das alternativas citadas, Andres, 2017, justifica a utilização de um pré-aquecedor de lingotes para fornos de fusão de alumínio com aproveitamento de gases de exaustão através da redução da energia necessária para fundir e aquecer o alumínio em 33% com o material pré-aquecido a 400°C. Morris, 2013, realizou um estudo no mesmo assunto, e através de sua simulação de operação de um forno de fusão revérbero com câmara de abastecimento lateral com capacidade de fusão de 120,5 kg/min, concluiu que a cada 100°C de aumento da temperatura do material a ser adicionado ao forno, o consumo de combustível reduz em 5,5% e a temperatura dos gases de exaustão reduz em 60°C.

Os estudos acima citados demonstram a valia de explorar soluções para redução de consumo de combustível em fundições, que constitui considerável parcela dos custos gerais de produção neste tipo de indústria. A partir disto, foi proposta a análise de modificações de processo com potencial de redução de consumo de combustível em um forno de fusão de alumínio tipo soleira seca.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. Objetivo Geral

Estudar diferentes condições de entrada de lingotes de alumínio e de retorno de fundição em um forno de fusão tipo soleira seca, verificando o consumo de combustível a fim de obter redução de custos no processo de fusão.

#### 3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar experimentalmente o processo de fusão em forno de soleira seca com diferentes tipos de carregamento;
- Desenvolver balanço energético do forno em questão;
- Analisar o comportamento do forno sob diferentes condições de entrada do material com foco na redução de combustível.

#### 4. CARACTERIZAÇÃO DE PROCESSO DE FUSÃO EM FORNO TIPO SOLEIRA SECA

A caracterização do processo de fusão no forno estudado abrange o detalhamento das suas zonas de operação, do seu sistema de combustão, dos materiais utilizados e das características operacionais em regime usual de trabalho,

##### 4.1.Forno de Fusão

O forno de fusão utilizado no experimento é da marca Master Fiber, cujo projeto reformulado algumas vezes por diferentes empresas. Na Figura 4.1, é possível verificar as principais zonas do forno: pré-aquecimento (1), fusão (2) e manutenção do banho de alumínio (3). O forno é equipado com quatro queimadores da marca Kromschroder, sendo dois na zona de manutenção, modelo BIO 100 KB (potência máxima de 230 kW cada), e dois na zona de fusão, modelo BIO 140 RB (potência máxima de 450 kW cada). A alimentação de ar do forno se dá através de um ventilador com vazão mínima de 384 Nm<sup>3</sup>/h e vazão máxima de 1716 Nm<sup>3</sup>/h. Esta vazão varia conforme a necessidade de ar para os queimadores, que modulam conforme a temperatura dentro de cada zona. A Tabela 4.1 mostra a vazão mínima e máxima de ar e de combustível dos queimadores.

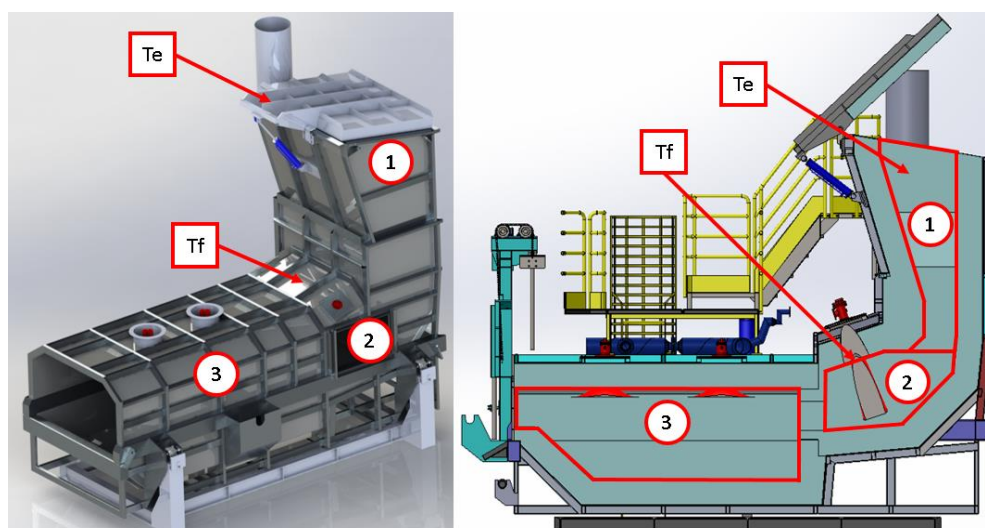


Figura 4.1: Forno de fusão de alumínio tipo soleira seca. Zonas: 1) Pré-aquecimento (torre). 2) Fusão. 3) Manutenção do banho de alumínio líquido. É indicada a localização dos termopares da zona de fusão (Tf) e da exaustão (Te).

Vazão dos Queimadores				
	Fusão		Manutenção	
	Chama Baixa	Chama Alta	Chama Baixa	Chama Alta
Ar [m <sup>3</sup> /h]	280	1000	200	500
Gás Natural [m <sup>3</sup> /h]	26	80	20	46
Excesso de ar [%]	7	25	0	7

Tabela 3.1: Vazão mínima e máxima de ar e de combustível dos queimadores.

##### 4.2.Material Utilizado

O forno opera com gás natural, e a liga de alumínio utilizada no processo é a A380, fornecida para a empresa em lingotes de 8 kg. Para o experimento alguns lingotes foram cortados em três pedaços de volume aproximadamente igual, para analisar o comportamento

do forno com diferentes condições de carregamento. As propriedades do gás natural e da liga estão descritas no Anexo I. O processo de fundição sob pressão gera retorno de material (canais de alimentação e saídas de ar) denominadas de galhos, que variam para cada projeto de produto e molde de injeção. A Figura 4.2 ilustra os dois tipos de lingotes e exemplifica os galhos da produção.



Figura 4.2: Material utilizado no abastecimento do forno. 1) Lingotes. 2) Lingotes cortados. 3) Galhos.

#### 4.3. Parâmetros de Processo

O processo de fusão inicia com o carregamento das caçambas com o material a ser adicionado no forno – caçambas com retorno de fundição são movimentadas desde as injetoras até o forno, e os lingotes são adicionados manualmente. A quantidade de lingotes pode variar de acordo com a demanda da produção. A caçamba é, então, posicionada no elevador de carregamento, e o forno é abastecido através da porta de alimentação localizada no topo da torre. O material adicionado é pré-aquecido, fundido e aquecido até a temperatura de trabalho definida. Conforme necessidade, o forno bascula para que seja feito o vazamento do metal líquido para as painéis de transporte, que possuem capacidade de carga de 450 kg. Por medida de segurança, há um sensor de nível máximo de banho na bica de vazamento. Caso o banho encha até seu limite, o alumínio líquido encosta no sensor que envia um sinal ao IHM (interface homem-máquina) para desligar os queimadores da zona de fusão. A Figura 4.3 ilustra as etapas do processo de fusão descrito.

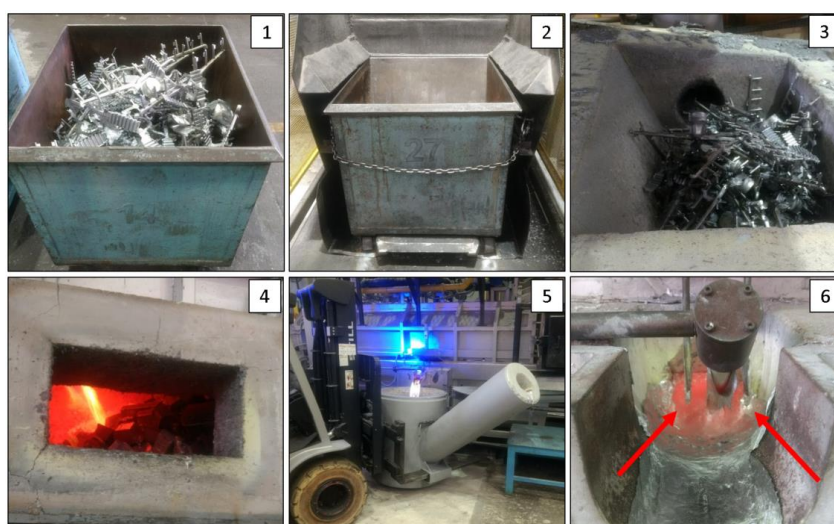


Figura 4.3: Processo de fusão. 1) Caçamba carregada. 2) Elevador de carregamento. 3) Material na zona de pré-aquecimento. 4) Zona de fusão. 5) Vazamento de metal líquido para painéis de transporte. 6) Sensor de nível na bica de vazamento.



## 5. BALANÇO ENERGÉTICO DE FORNO DE FUSÃO EM REGIME DE OPERAÇÃO

O balanço energético apresentado baseia-se na modelagem de um forno de fusão em regime de operação, analisando a transferência de calor em regime permanente na combustão dos queimadores, no alumínio, nos gases e nas paredes do forno, dentro do volume de controle definido.

### 5.1. Balanço Energético de Volume de Controle em Regime Permanente

Considerando um volume de controle em regime permanente a situação da massa, das vazões mássicas e das taxas de transferência de energia são constantes com o tempo. Com isso, é possível definir o balanço de energia em regime permanente como:

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m} \left[ (h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(z_1 - z_2) \right] \quad (5.1)$$

onde  $\dot{Q}_{vc}$  é a taxa de transferência de calor,  $\dot{W}_{vc}$  é o trabalho realizado e  $\dot{m}$  é a vazão mássica no volume de controle. O primeiro termo dentro dos colchetes representa a variação de entalpia ( $h$ ), o segundo a variação de energia cinética ( $V =$  velocidade) e o terceiro a variação de energia potencial ( $g =$  aceleração da gravidade e  $z =$  altura) entre entrada e saída do volume de controle.

O forno de fusão estudado se mantém em regime de produção 24h por dia, e sua operação varia com a demanda de alumínio da fábrica. Com isto, é necessário manter uma condição estável de operação (torre cheia) para considerar o volume de controle em regime permanente. Considera-se, portanto, que a vazão mássica de ar, de gás natural e de alumínio se mantêm constante dentro do forno, e que há variação nas temperaturas de entrada e de saída deste material no volume de controle. Considera-se também que o calor adicionado através da combustão nos queimadores é utilizado para fundir e aquecer o alumínio e é absorvido pelos gases de exaustão e pelas paredes (perdas). A Figura 5.1 ilustra o balanço de massa e o balanço de calor do volume de controle.

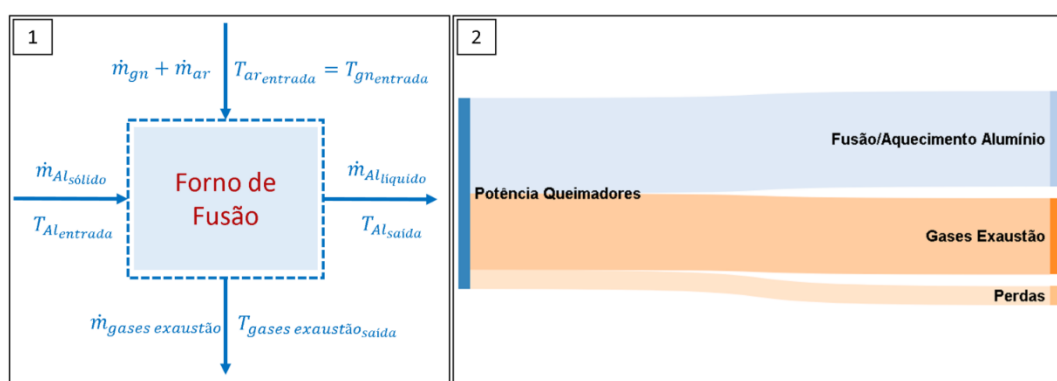


Figura 5.1: Representação esquemática dos balanços de massa (esquerda) e de energia (direita) de um forno de fusão de alumínio em regime de operação.

Admitindo que  $\dot{W}_{vc}$  é nulo e que não há variação de energia cinética e potencial, pode-se reescrever o balanço de energia como:

$$\dot{Q}_{queimadores} = \dot{Q}_{Al} + \dot{Q}_{ar} + \dot{Q}_{perdas} \quad (5.2)$$

onde  $\dot{Q}_{queimadores}$  representa a transferência de calor gerada pela combustão nos queimadores para o volume de controle,  $\dot{Q}_{Al}$  representa a transferência de calor para fundir e

aquecer o alumínio,  $\dot{Q}_{ar}$  é a transferência de calor para os gases de exaustão e  $\dot{Q}_{perdas}$  representa todo o calor transferido e que não foi aproveitado no processo. A unidade utilizada no estudo é kW.

## 5.2. Transferência de Calor na Combustão dos Queimadores

De acordo com CONAI, 2017, a transferência de calor na combustão em queimadores se dá a partir da fórmula:

$$\dot{Q}_{queimadores} = \dot{V}_{gn} * PCI \quad (5.3)$$

onde  $\dot{V}_{gn}$  é a vazão de gás natural em Nm<sup>3</sup>/s e PCI é o poder calorífico inferior do gás natural em kJ/Nm<sup>3</sup>.

## 5.3. Transferência de Calor para o Alumínio

No processo de fusão descrito, o alumínio entra sólido no volume de controle a uma temperatura  $T_{Al_{entrada}}$ , aquece até a temperatura de fusão da liga  $T_{Al_{fusão}}$ , funde e aquece novamente até a temperatura desejada no processo  $T_{Al_{final}}$ , quando sai do volume de controle. Todas as temperaturas são descritas em K. Baseando-se na descrição para a energia térmica de sistemas com escoamento em regime estacionário é possível descrever a transferência de calor para o alumínio como:

$$\dot{Q}_{Al} = \dot{m}_{Al} * \left( h_{Al_{fusão}} + c_{p_{Al,s}} * (T_{Al_{fusão}} - T_{Al_{entrada}}) + c_{p_{Al,l}} * (T_{Al_{final}} - T_{Al_{fusão}}) \right) \quad (5.4)$$

onde  $h_{Al_{fusão}}$  é o calor latente de fusão do alumínio em kJ/kg,  $c_{p_{Al,s}}$  é o calor específico do alumínio no estado sólido e  $c_{p_{Al,l}}$  é o calor específico do alumínio no estado líquido, ambos em kJ/kgK. Hengelmolen, 2017, cita que a quantidade de calor necessária para fundir e aquecer uma tonelada de liga de alumínio até 770 °C é de aproximadamente 340 kWh/ton.

## 5.4. Transferência de Calor para os Gases

Considera-se que a vazão mássica de gases na entrada (ar e gás natural) é constante e igual à vazão mássica de gases na saída (produtos de combustão), expressa em kg/s como  $\dot{m}_{ar_{total}}$ . O calor específico dos gases de entrada e de saída do volume de controle é aproximado como calor específico do ar, variando de acordo com a temperatura do mesmo. Logo, a transferência de calor para os gases no volume de controle é expressa como:

$$\dot{Q}_{ar} = \dot{m}_{ar_{total}} * c_{p_{ar}} * (T_{ar_s} - T_{ar_e}) \quad (5.5)$$

onde  $c_{p_{ar}}$  é o valor médio do calor específico em kJ/kg-K do ar na temperatura (K) de saída e de entrada do volume de controle, respectivamente  $T_{ar_s}$  e  $T_{ar_e}$ .

## 5.5. Transferência de Calor para as Paredes do Forno

A taxa de calor perdido pelas paredes pode ser determinada pela taxa de calor conduzida através das paredes. Admitindo condução unidirecional para a transferência de calor por condução em paredes planas compostas utilizando circuitos térmicos e que considera-se que o calor dado como perda no processo é transferido para as paredes do forno, define-se:

$$\dot{Q}_{paredes} = \dot{Q}_{perdas} = \sum_1^n \dot{Q}_{parede_n} = \sum_1^n \frac{A_n \cdot (T_i - T_e)}{\sum_1^n \frac{L_w}{k_w}} \quad (5.6)$$

onde  $T_i$  e  $T_e$  são as temperaturas (K ou °C) interna e externa às paredes compostas,  $A_n$  é a área superficial (m<sup>2</sup>) das paredes compostas planas da zona  $n$ ,  $L_w$  é a espessura (m) e  $k_w$  é a condutividade térmica (W/mK) do material  $w$ .

## 6. METODOLOGIA

A metodologia consiste na comparação entre os resultados encontrados na caracterização experimental de ciclos de fusão de um forno de fusão tipo soleira seca com carregamento variado (somente lingotes, retorno de fundição e lingotes, somente lingotes cortados e retorno de fundição e lingotes cortados) e o balanço energético construído para o volume de controle em questão, a fim de analisar a influência de diferentes tipos de carregamento no processo de fusão e de validar o balanço de energia construído. O modelo validado foi utilizado para estudar a influência da variação de temperatura do alumínio alimentado sobre o consumo de combustível. Faz parte desta seção a descrição dos instrumentos de medição, do acompanhamento e do detalhamento dos experimentos realizados, da aplicação do balanço energético, da comparação dos resultados experimentais e teóricos e da análise teórica quanto à variação de temperatura de entrada do material.

### 6.1. Instrumentos de Medição

São utilizados no forno termopares tipo K com capa protetora de carbetto de silício. A zona de fusão possui dois termopares tipo K próximos (um ligado à IHM e um de *backup*). OMEGA, 2017, indica a incerteza de medição dos termopares tipo K como 2,2°C ou 0,75% para medições acima de 0°C. Para o registro dos dados foi utilizado um *datalogger* da marca National Instruments modelo NI PXI-1031. Este instrumento de aquisição de dados necessita de um sinal único dos termopares, visto que já foi mapeada a variação de medidas quando o sinal de um mesmo sensor é compartilhado entre IHM e o *datalogger*. O sinal do termopar de *backup* foi utilizado para a aquisição de dados da temperatura na zona de fusão. Ao lado do termopar da exaustão do forno foi posicionado um termopar tipo K sem capa de proteção para a aquisição de dados neste ponto. A vazão de combustível é medida através de um medidor de fluxo de gás natural (m<sup>3</sup>) Kromschroder modelo DM 160Z80-40 que envia as suas medições para o IHM. Kromschroder, 2017, explicita a incerteza de medição do medidor de fluxo de gás natural como sendo menor ou igual a 1,5%.

### 6.2. Descrição dos Experimentos

A caracterização experimental do processo de fusão deu-se por meio de quatro experimentos. A fim de permitir comparações, foi mantido aproximadamente o mesmo nível de material dentro da zona de pré-aquecimento (torre cheia). A leitura das temperaturas de fusão e de exaustão foi realizada pelo *datalogger* e manualmente na IHM. Foi encontrada uma diferença média de 79°C para a temperatura da zona de fusão e de 24°C para a temperatura de exaustão entre as medições do *datalogger* e da IHM, o que se deve à diferente localização dos termopares. A fim de considerar a temperatura média em cada zona, foram utilizadas as medições do *datalogger*, que possui uma resolução temporal maior, porém corrigidas considerando esta diferença média (39°C e 12°C, respectivamente). Os valores de consumo de gás natural foram adquiridos diretamente do IHM. Todos os experimentos foram realizados durante operação normal da fábrica, o que dificulta a medição das grandezas, em particular a vazão mássica de alumínio. É ilustrado no apêndice I um memorial de experimento dos dados do IHM realizados em um dos testes.

### 6.2.1. Experimento 1 - Carregamento com lingotes comuns

O primeiro teste foi realizado após a limpeza do forno, para que fosse possível reproduzir a condição desejada de carregamento por completo. Iniciou-se o carregamento apenas com caçambas de retorno de fundição, para que fosse possível criar uma área de amortecimento para o impacto dos lingotes. É possível observar a região de interface entre zona de fusão e de pré-aquecimento pela porta de limpeza da zona de fusão, e a partir disto adicionou-se retornos de fundição até esta interface. Após, iniciou-se o carregamento de lingotes comuns – processo que pode ser visto na Figura 6.1. A condição de torre cheia foi estabilizada durante a última hora de teste. Os valores encontrados para a vazão de alumínio dentro do forno foram coletados através da medição do tempo entre o momento em que foram retiradas painéis de alumínio (450 kg) quando o banho estava cheio até que o banho atingisse seu nível máximo novamente (verificado pelo sensor de nível).



Figura 6.1: Sequência de carregamento do forno no experimento com apenas lingotes comuns. A cena 4 exemplifica o padrão de torre cheia mantido.

### 6.2.2. Experimento 2 - Carregamento com lingotes comuns e retorno de fundição

O segundo experimento foi iniciado da mesma maneira que o primeiro – primeiramente foi criada uma área de amortecimento para a carga. A sequência de carregamento pode ser vista na Figura 6.2. Houve problemas com a produção e não foi possível manter a torre completamente cheia nos primeiros 90 minutos de teste. Neste mesmo período, foi possível verificar que havia falha em um queimador da zona de fusão e que os parâmetros de controle desta zona haviam sido modificados no dia anterior. Considerou-se, portanto, apenas as duas horas finais do teste, quando os problemas foram corrigidos e a torre foi mantida completamente cheia. Todos os dados foram coletados da mesma maneira que no primeiro experimento.



Figura 6.2: Sequência de carregamento do forno no experimento com lingotes comuns e retorno de fundição. A cena 4 exemplifica o padrão de torre cheia mantido.

### 6.2.3. Experimento 3 - Carregamento com lingotes cortados

O terceiro experimento seguiu o padrão dos dois primeiros, e não houve variação dos parâmetros de controle. A condição de carregamento se manteve estável ao longo de 1,5 h durante a coleta de dados. A sequência de carregamento pode ser vista na Figura 6.3.



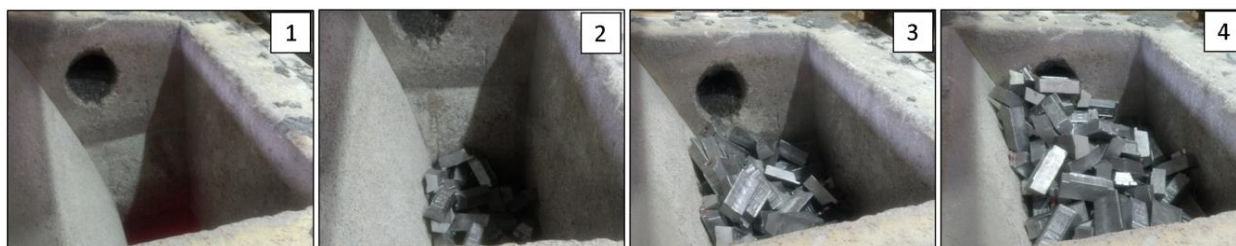


Figura 6.3: Sequência de carregamento do forno no experimento com apenas lingotes cortados. A cena 4 exemplifica o padrão de torre cheia mantido

#### 6.2.4. Experimento 4 - Carregamento com lingotes cortados e retorno de fundição

O último experimento foi realizado após o terceiro, para que não houvesse prejuízo para a produção da fábrica, visto que o abastecimento de lingotes comuns já havia sido substituído para a utilização dos lingotes cortados. Após o término do terceiro experimento, acompanhou-se a redução de nível de material na torre, até que a interface entre as duas zonas fosse alcançada. Então, iniciou-se o carregamento desejado, que é ilustrado pela Figura 6.4. A duração da coleta de dados foi de 1,5 h, dado que a quantidade de lingotes cortados era limitada. Seguiu-se o mesmo padrão de coleta de dados dos outros experimentos.

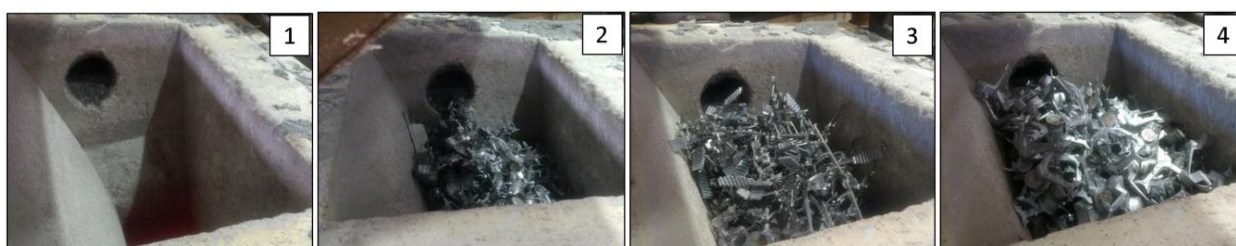


Figura 6.4: Sequência de carregamento do forno no experimento com lingotes cortados e retorno de fundição. A cena 4 exemplifica o padrão de torre cheia mantido.

### 6.3. Aplicação do Balanço de Energia

#### 6.3.1. Temperatura de Saída dos Gases de Exaustão

A temperatura de saída dos gases de exaustão é fator determinante para a definição da transferência de calor para os gases no volume de controle. O valor utilizado para o balanço de energia é a temperatura média da exaustão durante o período considerado em cada experimento.

#### 6.3.2. Normalização da Vazão Volumétrica

A medição de vazão volumétrica de gás natural no forno estudado se dá em  $m^3$ . Valores de consumo de combustível em fornos de mercado são normalizados, e para efeitos comparativos os valores normalizados ( $Nm^3$ ) foram utilizados, através da fórmula:

$$\dot{V}_{gn_e} = \frac{\dot{V}_{m^3} * P_{abs}}{273 + T_{ambiente}} \quad (6.1)$$

onde  $V_{m^3}$  é a vazão volumétrica de combustível ( $m^3$ ) obtida nas medições dos experimentos,  $P_{abs}$  é a pressão absoluta onde está instalado o medidor de vazão (1,25 bar) e  $T_{ambiente}$  é a temperatura do ambiente, definida como 35°C. Como os valores são conhecidos, têm-se:

$$\dot{V}_{gn_e} = \dot{V}_{m^3} * 1,108 \quad (6.2)$$

### 6.3.3. Vazão Volumétrica de Ar

CONAI, 2017, explica que os queimadores de gás natural da marca Kromschroder são construídos para utilizar relação volumétrica ar/combustível de 10:1. Considerando que quando a torre está cheia os queimadores operam 90% do tempo em potência mínima, estimou-se um excesso de ar de 4%. Assim, a vazão volumétrica de ar (Nm<sup>3</sup>) foi calculada por:

$$\dot{V}_{ar_e} = 10,4 * \dot{V}_{gn_e} \quad (6.3)$$

### 6.3.4. Cálculo das Vazões Mássicas

Considerando comportamento de gás ideal, a vazão mássica de ar total do volume de controle,  $\dot{m}_{ar_{total}}$ , é obtida de:

$$\dot{m}_{ar_{total}} = \dot{m}_{ar_e} + \dot{m}_{gn_e} = \frac{\dot{V}_{ar_e} * P_{abs_e} * W_{molar_{ar}}}{R * T_{ar_e}} + \frac{\dot{V}_{gn_e} * P_{abs_e} * W_{molar_{gn}}}{R * T_{gn_e}} \quad (6.4)$$

onde  $P_{abs_e}$  é a pressão absoluta local definida como 101 kPa,  $R$  é a constante universal dos gases (8,314 kJ/kmolK) e  $W_{molar_{ar}}$  e  $W_{molar_{gn}}$  são as massas molares de ar e de gás natural respectivamente, apresentadas no apêndice II.

### 6.3.5. Transferência de Calor pelas Paredes

A transferência de calor pelas paredes do forno foi calculada com base em medições das temperaturas nas superfícies interna e externa do forno em regime de operação. O cálculo detalhado pode ser consultado no apêndice III. O resultado representa 5% do calor transferido pela combustão dos queimadores quando carregados com lingotes e galhos (processo atual). Pela dificuldade de reprodução de condição estável de operação com outro tipo de carregamento, foi mantido este valor nos outros experimentos.

## 6.4. Comparação de Resultados Experimentais e Teóricos

A aplicação do balanço de energia (equação 5.2) se dá utilizando as equações 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6, que devem ser calculadas com os resultados experimentais e com as propriedades dos materiais descritas no Anexo A. O modelo criado para o volume de controle é baseado em hipóteses e aproximações, e as medições experimentais foram realizadas em regime de operação. Estes fatos embasam a determinação do erro inerente às análises, chamado de  $\dot{Q}_{erro}$ , definido como:

$$\dot{Q}_{erro} = \dot{Q}_{queimadores} - \dot{Q}_{Al} - \dot{Q}_{ar} - \dot{Q}_{perdas} \quad (6.5)$$

## 6.5. Análise Teórica da Variação da Temperatura de Entrada dos Materiais

A variação da temperatura de entrada dos materiais interfere diretamente na transferência de calor para o alumínio dentro do forno, visto que na equação 5.4 o termo  $(T_{Al_{fusão}} - T_{Al_{entrada}})$  varia. A análise teórica da variação da temperatura de entrada dos materiais baseia-se na premissa de que os termos  $\dot{Q}_{erro}$ ,  $\dot{Q}_{ar}$  e  $\dot{Q}_{perdas}$  permanecem

constantes no balanço energético, e com isso é possível inferir que qualquer variação no termo  $\dot{Q}_{Al}$  implicará numa variação direta no termo  $\dot{Q}_{queimadores}$ . Como a transferência de calor proveniente da combustão nos queimadores está diretamente ligada ao consumo de combustível, têm-se:

$$\dot{V}_{gn_e}^* = \frac{\dot{Q}_{Al}^* + \dot{Q}_{ar} + \dot{Q}_{perdas} + \dot{Q}_{erro}}{PCI} \quad (6.6)$$

onde  $\dot{Q}_{Al}^*$  e  $\dot{V}_{gn_e}^*$  são a transferência de calor para o alumínio e o consumo de gás natural (Nm<sup>3</sup>) calculados com a variação da temperatura de entrada do material adicionado ao forno.

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos após a realização dos quatro experimentos práticos, do balanço energético do forno e da análise teórica da variação da temperatura de entrada dos materiais.

### 7.1. Resultados Experimentais

São apresentados nesta seção os resultados dos quatro experimentos realizados na Tabela 7.1. É possível verificar o comportamento, no período definido para cada experimento, das temperaturas da zona de fusão e da exaustão do forno no Apêndice IV.

Experimento 1 (lingotes comuns)		Experimento 2 (lingotes comuns e galhos)	
Vazão de Combustível [Nm <sup>3</sup> /h]	55,40	Vazão de Combustível [Nm <sup>3</sup> /h]	47,16
Vazão Mássica de Alumínio [kg/h]	1141	Vazão Mássica de Alumínio [kg/h]	964
Temp. Média - Exaustão [°C]	478	Temp. Média - Exaustão [°C]	372
Temp. Mínima - Exaustão [°C]	415	Temp. Mínima - Exaustão [°C]	302
Consumo de Combustível [Nm <sup>3</sup> /ton]	48,55	Consumo de Combustível [Nm <sup>3</sup> /ton]	48,90

Experimento 3 (lingotes cortados)		Experimento 4 (lingotes cortados e galhos)	
Vazão de Combustível [Nm <sup>3</sup> /h]	41,26	Vazão de Combustível [Nm <sup>3</sup> /h]	35,07
Vazão Mássica de Alumínio [kg/h]	1125	Vazão Mássica de Alumínio [kg/h]	950
Temp. Média - Exaustão [°C]	291	Temp. Média - Exaustão [°C]	272
Temp. Mínima - Exaustão [°C]	269	Temp. Mínima - Exaustão [°C]	247
Consumo de Combustível [Nm <sup>3</sup> /ton]	36,67	Consumo de Combustível [Nm <sup>3</sup> /ton]	36,91

Tabela 7.1: Resultados experimentais.

Percebe-se que a redução do tamanho dos lingotes favorece o melhor aproveitamento da energia dos gases, visto que ocorreu uma redução considerável de consumo de combustível utilizando lingotes cortados. Complementarmente, as temperaturas da exaustão (mínima e média) medidas foram menores quando utilizou-se lingotes cortados no lugar de lingotes comuns e quando foi realizado carregamento com galhos ao invés de somente lingotes. A utilização de lingotes cortados e de galhos no carregamento favorece a compactação do material na zona de pré-aquecimento, e com isso o melhor aproveitamento da energia dos gases, o que está de acordo com as referências consideradas.

Durante a realização dos experimentos 3 e 4 foi observada maior estabilidade da temperatura de exaustão durante a realização do experimento, o que pode ser verificado no apêndice IV. A melhor reprodução do regime estacionário foi conseguida nestes dois experimentos.

Os valores demonstrados correspondem a valores médios no período considerado, e não é possível inferir as incertezas, tendo em vista que as medições foram realizadas em regime de operação na fábrica. É difícil manter uma condição de operação estável por longos períodos, visto que a demanda de alumínio da fábrica apresenta variações, que não há disponibilidade dos operadores a todo momento e que a quantidade de lingotes cortados era limitada (no caso dos experimentos 3 e 4).

A variável de maior dificuldade de medição é a vazão de alumínio no forno, visto que a medição de banho cheio pelo sensor de nível não é precisa. A presença de pedaços de alumínio ou sujeira na ponta do sensor variam o seu comprimento útil, e a inércia térmica do forno permite que mesmo após o desligamento dos queimadores da zona de fusão certa quantidade de material ainda siga para o banho, variando o nível acima do determinado como máximo pelo sensor. Estas variações são fontes de erro, visto que para cada milímetro de variação na altura do banho ocorre uma variação aproximada de 11kg de alumínio líquido dentro do banho. Como consequência não é possível quantificar com exatidão a variação de consumo de combustível do forno entre carregamentos somente com lingotes e misturados com galhos, visto que os valores são semelhantes do ponto de vista deste experimento.

O potencial de redução de consumo de combustível justifica a continuação das análises neste tipo de processo de fusão, a fim de realizar medições mais confiáveis a fim de quantificar com maior precisão a redução de consumo de combustível no forno com as diferentes práticas de carregamento.

## 7.2. Resultados do Balanço Energético

Para cada condição de operação foi feito o balanço de energia conforme descrito na metodologia, e os resultados são apresentados na Tabela 7.2.

Balanço de energia 1 (lingotes comuns)				Balanço de energia 2 (lingotes comuns e galhos)			
$\dot{Q}_{\text{queimadores}}$	[kW]	551,17	100%	$\dot{Q}_{\text{queimadores}}$	[kW]	469,19	100%
$\dot{Q}_{Al}$	[kW]	359,50	65%	$\dot{Q}_{Al}$	[kW]	303,73	65%
$\dot{Q}_{ar}$	[kW]	88,55	16%	$\dot{Q}_{ar}$	[kW]	56,78	12%
$\dot{Q}_{perdas}$	[kW]	27,56	5%	$\dot{Q}_{perdas}$	[kW]	23,46	5%
$\dot{Q}_{erro}$	[kW]	75,56	14%	$\dot{Q}_{erro}$	[kW]	85,22	18%

Balanço de energia 3 (lingotes cortados)				Balanço de energia 4 (lingotes cortados e galhos)			
$\dot{Q}_{\text{queimadores}}$	[kW]	410,49	100%	$\dot{Q}_{\text{queimadores}}$	[kW]	348,91	100%
$\dot{Q}_{Al}$	[kW]	354,46	86%	$\dot{Q}_{Al}$	[kW]	299,32	86%
$\dot{Q}_{ar}$	[kW]	37,73	9%	$\dot{Q}_{ar}$	[kW]	28,44	8%
$\dot{Q}_{perdas}$	[kW]	20,52	5%	$\dot{Q}_{perdas}$	[kW]	17,44	5%
$\dot{Q}_{erro}$	[kW]	-2,23	1%	$\dot{Q}_{erro}$	[kW]	3,70	1%

Tabela 7.2: Resultados dos Balanços de Energia

Verifica-se que os valores encontrados para  $\dot{Q}_{Al}$  são da mesma ordem de grandeza dos valores citados por Hengelmolen, 2017. Percebe-se que  $\dot{Q}_{erro}$  é maior nos experimentos com lingotes comuns do que nos experimentos com lingotes cortados, o que é atribuído à uma melhor compactação e ocupação da torre, e consequentemente à melhor reprodução do regime estacionário durante o experimento.

A discrepância no balanço, representada por  $\dot{Q}_{erro}$ , embute os erros da medição da determinação da vazão mássica de alumínio no forno. Uma análise de sensibilidade no balanço do experimento 2 demonstrou que a variação da vazão mássica entre os valores mínimo e máximo encontrados nos experimentos resulta em uma variação de  $\dot{Q}_{erro}$  de aproximadamente 60 kW.

### 7.3. Resultados da Análise Teórica da Variação da Temperatura de Entrada dos Materiais

Para cada balanço energético foi realizada uma análise da variação de temperatura de entrada do material (exemplificada em aumento de 100°C), que é apresentada na Tabela 7.3.

Resultados - Variação de 100 °C na temperatura de entrada do material		
Balanço de Energia	Redução de potência no forno [kW]	Redução de consumo de combustível [%]
1	30,50	5,53
2	29,45	6,28
3	30,10	7,33
4	25,40	7,28

Tabela 7.3: Resultados da análise teórica para cada 100°C de elevação de temperatura do material na entrada do forno.

A redução de consumo encontrada está de acordo com a redução citada por Morris, 2013. Verifica-se também que se for considerada uma variação de temperatura de 400°C no material, ocorre uma redução de  $\dot{Q}_{Al}$  de 33%, o que está de acordo com os valores citados por Andres, 2017.

Verifica-se que o potencial de redução de consumo de combustível com o aumento da temperatura dos lingotes é significativo. Tendo em conta o impacto de  $\dot{Q}_{erro}$  nesta análise (vide equação 6.6), justifica-se a realização de mais estudos visando a melhoria na aquisição de dados como a vazão mássica de alumínio e do refino do modelo estudado, por exemplo, com a análise do pré-aquecimento somente em lingotes e somente em galhos.

## 8. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada a caracterização experimental de ciclos de um forno de fusão tipo soleira seca com carregamento variado e analisada a influência do tamanho dos lingotes e da temperatura sobre o consumo de combustível. Foi realizado um balanço de energia para este processo e, após sua validação, o modelo proposto foi utilizado para estudar a influência da variação de temperatura do alumínio alimentado sobre o consumo de combustível. Os objetivos propostos foram alcançados, e as principais conclusões são:

- A utilização de lingotes cortados e de galhos no carregamento favorece a compactação do material na zona de pré-aquecimento, e com isso o melhor aproveitamento da energia dos gases;
- Existe um potencial considerável de redução de consumo ao utilizar lingotes cortados no carregamento do forno;
- A utilização de galhos junto com lingotes não representou potencial de redução de consumo nestes experimentos;
- Foi possível realizar o balanço energético do processo de fusão descrito a partir de dados de medição do forno em operação, respeitando as restrições impostas pelas variações do processo de produção;
- Foi encontrado um potencial de redução de consumo de combustível da ordem de 5% a 7% a cada 100 °C de variação de temperatura do material a entrar no forno, o que está

de acordo com outros trabalhos com foco em outros tipos de fornos encontrados na literatura, o que justifica os investimentos para aprimorar o modelo.

O potencial de redução de consumo de combustível encontrado justifica o aprofundamento deste estudo. Considerando as dificuldades encontradas na medição das grandezas envolvidas no balanço de energia, são sugeridas as seguintes propostas para a continuação do trabalho:

- Aumentar o período de aquisição de dados para melhor definição do período admitido como o de funcionamento aproximadamente estacionário;
- Desenvolver uma metodologia para medição da vazão de entrada de material;
- Desenvolver um modelo do forno utilizando ferramentas CFD para melhorar a identificação da influência dos parâmetros operacionais sobre a eficiência do processo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbott A, A; H. C. Van Ness, J. M. **“Introdução à Termodinâmica na Engenharia Química”** - Smith 7ª Edição, 2007.
- Andres GmbH, **“Vorwärmkammern für 2, 4 oder 8 Masselpakete”**, <http://www.andres-gmbh.com/vorwaermkammern.html>. 2017. Acessado em 03/11/2017.
- Chander, Subhash; Ray, Anjan. **“Flame impingement heat transfer: A review”**. Energy Conversion and Management, [s. l.], v. 46, n. 18–19, p. 2803–2837, 2005.
- CONAI, **“Treinamento em sistemas de combustão de gás na indústria”**, Apostila de treinamento. 2017.
- Dias, L. **“Estudo e otimização do processo de fusão da SLM”**. [s. l.], p. 132, 2013.
- Engineering Tool Box, **“Boiling points and specific heat of liquid metals”**, [https://www.engineeringtoolbox.com/liquid-metal-boiling-points-specific-heat-d\\_1893.html](https://www.engineeringtoolbox.com/liquid-metal-boiling-points-specific-heat-d_1893.html). 2017. Acessado em 07/11/2017.
- Hengelmolen, A., 2017; Comunicação pessoal com Rafael Matias.
- Insertec, **“MELTOWER® Tilting Tower FADB”**, [http://www.insertec.biz/images/pdfs/en/industrial-furnaces/aluminium-foundry/Meltower\\_FADB\\_En\\_09\\_09.pdf](http://www.insertec.biz/images/pdfs/en/industrial-furnaces/aluminium-foundry/Meltower_FADB_En_09_09.pdf). 2009. Acessado em 10/10/2017.
- Kennedy, Al; Eurotech, Kennedy. **“Aluminum Melt Furnaces : Principles of Fuel Economy”**, [s. l.], p. 1–13, [s.d.].
- Kromschröder, **“Flow meters brochure”**, [http://pirometer.hu//media/files/366\\_dm\\_de.pdf](http://pirometer.hu//media/files/366_dm_de.pdf). 2017. Acessado em 23/12/2017.
- Malpohl, K., Hillen, R., **“Aluminium melting furnaces for die casting”**, <https://www.foundry-planet.com/tr/ekipman/detail-view/5265/?cHash=c73f06cce626844b836183af799ddd2b>. Revista Foundry Planet, 2010. Acessado em 04/11/2017.
- Matweb, **“Aluminum A380.0 Die Casting Alloy”**, <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=5f92a8f7d6ad416c8ce9398cae14a363&ckck=1>. 2017. Acessado em 07/11/2017.
- Morris, A. E. **“AIMeltCalc – A System Balance Calculator for an Aluminum Melting Process”**, Revista Industrial Heating, 2013
- OMEGA, **“Revised Thermocouple Reference Tables”**, <https://br.omega.com/temperature/Z/pdf/z204-206.pdf>. 2017. Acessado em 23/12/2017.
- REFRATEK, **“Comunicação pessoal com Rafael Matias”**, 2017.
- StrikoWestofen, **“Classic and Plus +”**, <http://www.strikowestofen.com/en/products/melting/strikomelter/pure-melting/>. 2017. Acessado em 03/11/2017.
- Sulgás, **“Qualidade do Gás Natural – TRANSP. BRASILEIRA GASODUTO BRASIL-BOLIV – Novembro 2017”**. 2017.

## ANEXO I – Propriedades

Nesta seção são apresentadas as propriedades necessárias para os cálculos realizados neste trabalho.

- Calor específico do ar: foi definido como a média do calor específico do ar a 35 °C e a 300 °C, assumido como 1,0315 kJ/kgK. Abbott e Van Ness, 2007.
- Poder calorífico inferior do gás natural: 35816 kJ/m<sup>3</sup>. Sulgas, 2017.
- Propriedades térmicas da liga de alumínio A380 sólida. Matweb, 2017.
  - Calor latente de fusão: 389 kJ/kg
  - Calor específico do alumínio sólido: 0,963 kJ/kg-K
  - Temperatura de fusão: 543 °C
- Calor específico do alumínio líquido: 1,18 kJ/kgK. Engineering Tool Box, 2017.



## APÊNDICE I – Memorial de experimento

A Figura A.1 apresenta um exemplo de um dos memoriais dos experimentos realizado, correspondente ao experimento 3:

Coleta de Dados - IHM						Memorial	
Hora	T. Fusão	T. Exaustão	T. Banho	T. Manut.	Consumo GN	Hora	Comentário
12:07	865	424	772	778	34700	12:06	Preparando cama de galhos.
12:21	859	442	768	788	34709	12:28	Término de cama de galhos.
12:28	848	446	767	798	34715	12:32	Carga - primeira caçamba de lingotes.
12:42	869	445	770	822	34729	12:34	Carga - segunda caçamba de lingotes.
12:55	875	402	772	794	34736	12:39	Carga - terceira caçamba lingotes - 142 lingotes no total.
13:09	741	355	781	780	34740	12:40	Foto.
13:15	895	340	772	760	34743	12:45	Carga - quarta caçamba de lingotes.
13:22	864	323	764	785	34749	12:49	Foto.
13:37	881	306	759	805	34760	12:52	Carga - quinta caçamba de lingotes.
13:43	802	302	762	804	34763	12:53	Foto.
13:57	857	286	759	812	34773	13:05	Falha dos queimadores - redução da temperatura de fusão.
14:05	855	280	758	816	34779	13:06	Banho cheio.
14:12	846	281	760	822	34785	13:09	Basculamento.
14:30	824	283	772	805	34791	13:42	Banho cheio.
14:51	849	319	764	824	34808	13:43	Carga - sexta caçamba de lingotes - 142 lingotes novamente.
						13:43	Basculamento.
						14:12	Banho cheio.
						14:27	Basculamento.
						14:51	Banho cheio.

Figura A.1: Exemplo de coleta de dados do IHM e de memorial de experimento, correspondente ao experimento 3.

## APÊNDICE II – Massa molar

O valor de massa molar do ar ambiente é 28,96. A massa molar do gás natural utilizado foi obtidos através da Tabela A.1:

Massa Molar - Gás Natural Utilizado								Massa Molar Total [kg/kmol]
Composição	C1	C2	C3	C4+	N2	CO2	O2	
Fração Molar [%]	89,72	5,66	1,65	0,89	0,72	1,37	0,00	18,10
Massa Molar Componente [kg/kmol]	16,00	30,00	44,00	58,00	28,00	44,00	0,00	
Massa Molar Correspondente [kg/kmol]	14,36	1,70	0,73	0,51	0,20	0,60	0,00	

Tabela A.1: Cálculo realizado para definir a massa molar do gás natural utilizado. Fonte: Sulgás, 2017.

### APÊNDICE III – Cálculo de Transferência de Calor nas Paredes do Forno

É apresentado na Tabela A.1 os valores de condutividade térmica para os 8 materiais utilizados no forno. O cálculo realizado para definir a transferência de calor nas paredes do forno pode ser visto na Tabela A.2.

Material	K [W/mK]
A	0,054
B	0,13
C	2,18
D	2,18
E	1,25
F	0,33
G	1,80
H	2,19

Tabela A.2: Valores de condutividade térmica para 8 materiais utilizados no forno. Fonte: Refratek, 2017.

Zona	Área [m <sup>2</sup> ]	Ti [°C]	Te [°C]	L1 [m]	k1 [W/mK]	L2 [m]	k2 [W/mK]	L3 [m]	k3 [W/mK]	L4 [m]	k4 [W/mK]	Q̇ [kW]
1	7	400	80	0,05	0,054	0,114	0,13	0,136	2,18	0	0	1,20
2	2	600	80	0,10	0,054	0,30	2,18	0	0	0	0	0,52
3	5	800	80	0,15	0,33	0,15	2,18	0	0	0	0	6,88
4	8	800	80	0,10	0,054	0,20	2,18	0	0	0	0	2,96
5	6	750	80	0,14	0,33	0,16	1,80	0	0	0	0	7,83
6	10	800	80	0,05	0,054	0,063	0,13	0,032	1,25	0,155	1,80	4,73
Total												24,13

Tabela A.3: Cálculo realizado para a transferência de calor por condução nas 6 zonas definidas no forno.

### APÊNDICE IV – MEDIÇÕES DE TEMPERATURA REALIZADAS NOS TESTES

São apresentadas neste apêndice as medições de temperatura da zona de fusão e da exaustão obtidas nos experimentos pelo *datalogger* e corrigidas conforme item 6.2. São evidenciadas as temperaturas mínimas em cada experimento. É possível verificar que os experimentos 3 e 4 possuem um comportamento da temperatura de exaustão estável.

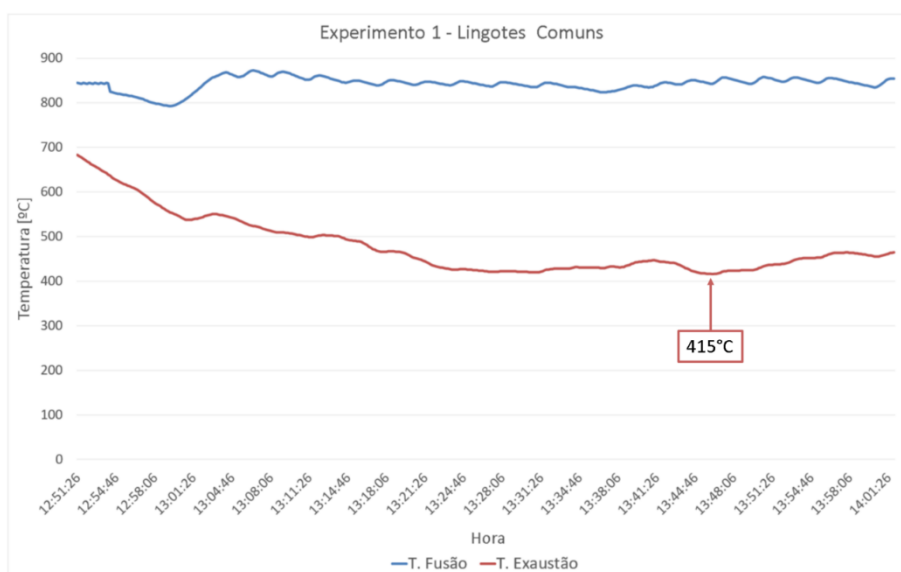


Figura A.2: Variação da temperatura da zona de fusão e da exaustão no experimento 1.

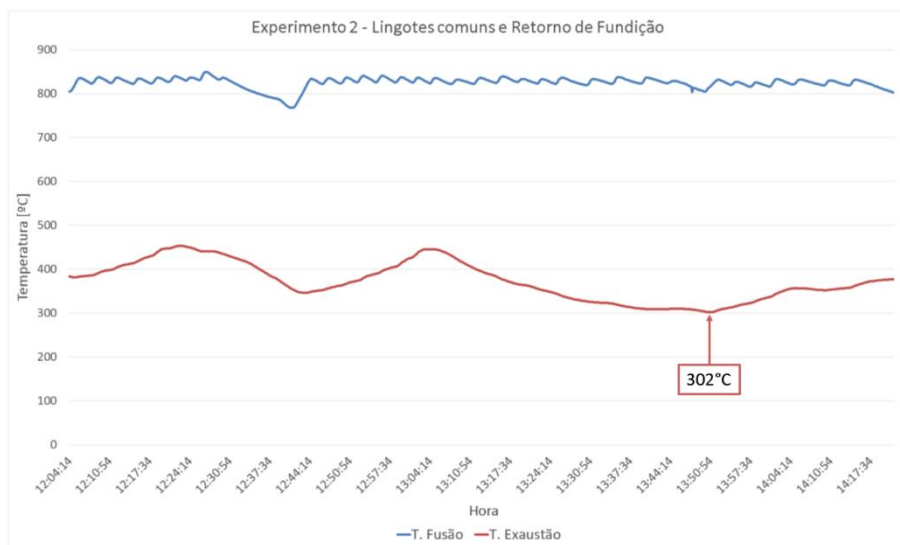


Figura A.3: Variação da temperatura da zona de fusão e da exaustão no experimento 2.

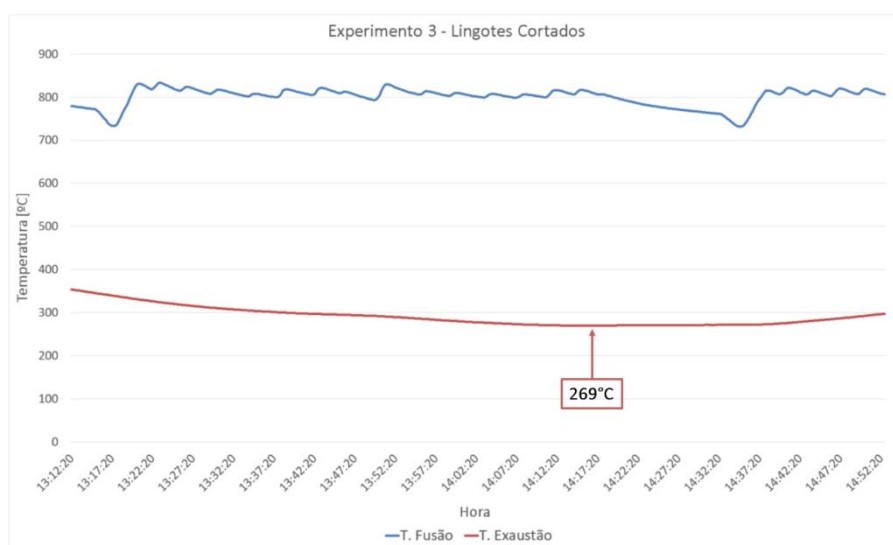


Figura A.4: Variação da temperatura da zona de fusão e da exaustão no experimento 3.

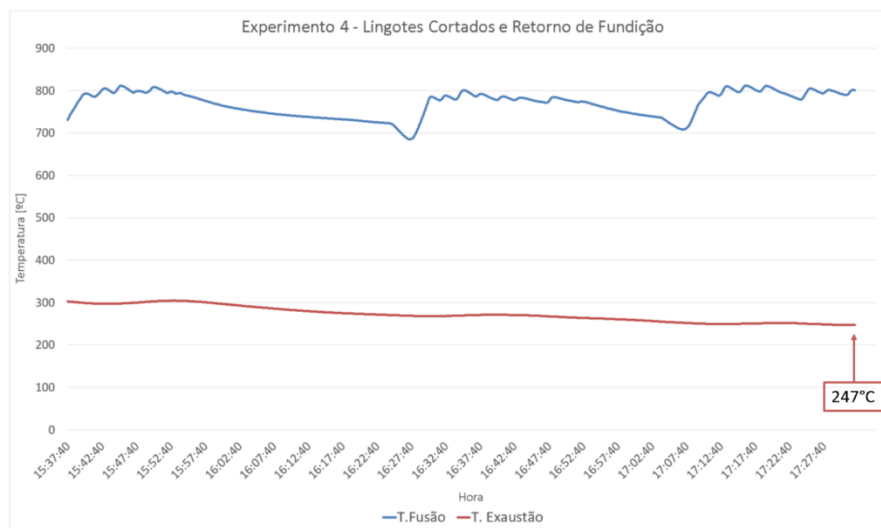


Figura A.5: Variação da temperatura da zona de fusão e da exaustão no experimento 4.