

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CÁSSIO CUNHA PACHECO BRANDHUBER

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA RECUPERADOR DE CALOR
POR FLUXO DE AR NA SOLIDIFICAÇÃO DO ALUMÍNIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA
2017

CÁSSIO CUNHA PACHECO BRANDHUBER

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA RECUPERADOR DE CALOR
POR FLUXO DE AR NA SOLIDIFICAÇÃO DO ALUMÍNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientador: Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne

PONTA GROSSA

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA RECUPERADOR DE CALOR POR FLUXO DE AR NA SOLIDIFICAÇÃO DO ALUMÍNIO

por

CÁSSIO CUNHA PACHECO BRANDHUBER

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 8 de dezembro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne
Orientador

Prof. Dr. Denilson José Marcolino de Aguiar
Membro Titular

Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**
Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Ao Prof. Dr. Ivanir Luiz de Oliveira pela orientação no programa PIBITI que deu origem a este trabalho.

A todos do DAMEC pela sua dedicação.

Aos colegas Tales e Fábio pela valorosa ajuda na realização dos experimentos.

A minha Mãe, pelo infinito apoio que me permitiu chegar até aqui.

RESUMO

BRANDHUBER, Cássio C.P. **CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA RECUPERADOR DE CALOR POR FLUXO DE AR NA SOLIDIFICAÇÃO DO ALUMÍNIO**. 2017. 62 p. Trabalho de Conclusão do Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

As indústrias de alumínio primário e secundário demandam grandes quantidades de energia, sendo um dos principais gastos inerentes ao processo. Grande parte da energia é gasta na fusão do metal, sendo perdida para o ambiente quando o alumínio solidifica-se, o que pode representar uma parcela importante do investimento inicial de energia em um forno de fundição comum. Em aplicações onde o metal é vazado em moldes permanentes, como é o caso de lingotes destinados a posterior refusão, é possível extrair o calor da solidificação e resfriamento e reintroduzi-lo no processo, de forma a aumentar a eficiência térmica, reduzindo custos com energia e garantindo produção mais limpa. Este trabalho avalia a extração deste calor através dos parâmetros térmicos envolvidos em um molde refrigerado a ar, tais como temperaturas obtidas, coeficientes de transferência térmica e eficiência da extração de calor, comparando-se o valor disponível nas etapas de solidificação e de resfriamento de um lingote com o alcançado pelo aumento na entalpia da vazão de uma massa de ar conhecida. Estuda-se também as possíveis aplicações do ar aquecido em uma indústria de alumínio secundário e sua efetividade como técnica de recuperação térmica. Os resultados indicam uma eficiência de extração de calor de 47% e uma quantidade de energia térmica de 386 kJ para cada quilograma de alumínio. A recuperação de calor do sistema experimental avaliado mostra-se promissor para o desenvolvimento de técnicas de reaproveitamento de energia térmica em processos de fundição.

Palavras-chave: Fundição. Alumínio. Recuperação térmica. Solidificação.

ABSTRACT

BRANDHUBER, Cássio C.P. **CONSTRUCTION AND ASSESSMENT OF A HEAT RECOVERY SYSTEM BY AIR FLOW IN THE ALUMINIUM SOLIDIFICATION**. 2017. 62 p. Monograph (Bachelor degree in Mechanical Engineering) – Federal University of Technology - Paraná, Ponta Grossa, 2017.

Primary and secondary aluminum industries demand large amounts of energy, being one of the main expenses inherent in the process. Most of the thermal energy is spent in the melting of the metal, being lost to the environment when the aluminum solidifies, which can represent an important fraction of the initial investment of energy in a common melting furnace. In applications where the metal is casted in permanent molds, as in the case of ingots intended for later re-melting, it is possible to extract the heat from the solidification and cooling and reintroduce it in the process in order to increase thermal efficiency, reducing energy costs and ensuring cleaner production. This work evaluates the extraction of this heat through the thermal parameters involved in an air-cooled mold, such as temperatures obtained, thermal transfer coefficients and heat extraction efficiency, comparing the available value in the solidification and cooling stages of a ingot with that achieved by the increase in the enthalpy of the flow of a known mass of air. It is also studied the possible applications of heated air in a secondary aluminum industry and its effectiveness as thermal recovery technique. The results indicate a heat extraction efficiency of 47% and a thermal energy quantity of 386 kJ for each kilogram of aluminum. The heat recovery system here assessed comes out as alternative for the development of waste heat recovery techniques in metal casting processes.

Keywords: Casting. Aluminium. Heat recovery. Solidification.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - a- Lingotes padronizados destinados à refusão; b- Bloco de motor solidificado em molde não permanente; c- perfil extrudado a partir de lingote..... | 14 |
| Figura 2 - Curvas de resfriamento apresentando super-resfriamento..... | 17 |
| Figura 3 - Curvas de resfriamento para a) metal puro sem superaquecimento, b) metal puro com superaquecimento, c) Liga monofásica com superaquecimento..... | 18 |
| Figura 4 - Mecanismos de transferência de calor em um sistema de solidificação unidirecional | 20 |
| Figura 5 - Perfis térmicos de um sistema unidirecional de condução em regime: (a) permanente; (b) transitório..... | 21 |
| Figura 6 - (a) Mecanismos de troca térmica na fronteira metal/molde; (b) Modelo equivalente de newton..... | 24 |
| Figura 7 - Circuito térmico equivalente de um sistema metal-molde.Fonte: Autoria Própria . | 26 |
| Figura 8 - Fluxograma das principais etapas de produção do alumínio primário..... | 34 |
| Figura 9 - Gráfico das principais fontes e demandas de calor identificadas na planta Alcoa Deschambault Quebec..... | 35 |
| Figura 10 - Desenho esquemático do experimento..... | 38 |
| Figura 11 - Molde utilizado no experimento..... | 39 |
| Figura 12 - Câmera de ar do experimento instalada | 40 |
| Figura 13 - Aparato de medição de vazão de ar do tipo placa de orifício..... | 41 |
| Figura 14 - Posição dos termopares empregados no experimento..... | 42 |
| Figura 15 - Temperaturas em função do tempo durante o experimento..... | 45 |
| Figura 16 - Variação do coeficiente global de transferência térmica em função do tempo.... | 47 |
| Figura 17 - Variação da potência de saída no tempo..... | 48 |
| Figura 18 - Calor acumulado em relação ao total extraído em função do tempo..... | 50 |
| Figura 19 - Eficiência e consumo de energia em fornos com ar pré-aquecido a 215°C e sem pré-aquecimento de ar..... | 52 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Composição química da liga utilizada no experimento..... | 43 |
| Tabela 2 - Condições iniciais do experimento..... | 43 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 8 |
| 1.1 OBJETIVO GERAL | 8 |
| 1.3 JUSTIFICATIVA | 9 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 12 |
| 2.1 SOLIDIFICAÇÃO..... | 12 |
| 2.1.1 Termodinâmica da solidificação | 14 |
| 2.1.1.1 O ponto de fusão | 14 |
| 2.1.1.2 Superaquecimento e Super-resfriamento | 16 |
| 2.1.1.3 Intervalo de solidificação | 17 |
| 2.1.2 Transferência de calor na solidificação | 18 |
| 2.1.2.2 Analogia com um circuito elétrico | 26 |
| 2.1.2.3 Coeficiente global de transferência de calor | 28 |
| 2.2 RECUPERAÇÃO TÉRMICA..... | 29 |
| 2.2.1 Fatores que afetam a viabilidade da recuperação térmica | 30 |
| 2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO | 32 |
| 2.3.1 Alumínio primário | 32 |
| 2.3.2 Alumínio Secundário | 35 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 38 |
| 3.1 MOLDE..... | 38 |
| 3.2 CÂMARA DE AR | 39 |
| 3.3 MEDIÇÃO DA VAZÃO DE AR..... | 40 |
| 3.4 LEITURAS DE TEMPERATURA..... | 42 |
| 3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL..... | 42 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 44 |
| 4.1 RENDIMENTO DA EXTRAÇÃO DE CALOR | 44 |
| 4.1.1 Perfis de temperatura | 44 |
| 4.1.2 Coeficiente global de transferência de calor..... | 46 |
| 4.1.3 Cálculo de eficiência..... | 47 |
| 4.2 POSSÍVEIS APLICAÇÕES DE RECUPERAÇÃO TÉRMICA..... | 50 |
| 4.2.1 Pré-aquecimento da carga | 50 |
| 4.2.2 PRÉ-AQUECIMENTO DO AR DE COMBUSTÃO | 52 |
| 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES | 54 |
| 6 REFERÊNCIAS | 56 |
| ANEXO 1- MÁQUINA DE LINGOTAMENTO ESTÁTICO | 58 |

1 INTRODUÇÃO

Na indústria do alumínio, a fusão do metal demanda grande quantidade de energia térmica, sendo um dos principais gastos inerentes ao processo. A eficiência do uso desta energia está ligada diretamente à forma como é direcionada ao material, através do forno. Parte do calor é perdida através das paredes do equipamento e gases aquecidos liberados para o ambiente. Diversas técnicas existem para se aproveitar este calor perdido e reinseri-lo em alguma parte do processo, sendo esta técnica conhecida como recuperação térmica. Este trabalho trata de outra grande fonte de calor, a solidificação e resfriamento do alumínio vazado em moldes permanentes.

Em abordagens tradicionais o metal vazado resfria-se naturalmente, perdendo calor para o ambiente, ou então solidifica-se em moldes refrigerados a água onde o calor também é liberado para o ambiente. Em situações onde não há necessidade de controle de resfriamento, como é o caso da produção de lingotes destinados a posterior refusão, há possibilidade de se extrair e direcionar este calor de volta ao processo. Esta técnica ainda é pouco estudada, mas há potencial para aumento de eficiência energética, redução de custos e produção mais limpa.

Este trabalho trata da quantificação do calor extraído da solidificação e resfriamento do alumínio utilizando-se a convecção forçada de ar e as possíveis aplicações para recuperação térmica nas indústrias do alumínio.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar um sistema de recuperação térmica com resfriamento a ar da solidificação de ligas de alumínio.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a funcionalidade de um aparato experimental que permita quantificar a extração de calor proveniente da solidificação e resfriamento do alumínio por um fluxo de ar.
- Avaliar parâmetros de eficiência térmica do processo de resfriamento.

- Avaliar o potencial de possíveis aplicações do ar aquecido dentro das indústrias de alumínio.

1.3 JUSTIFICATIVA

As demandas crescentes por alumínio no mundo indicam que os novos empreendimentos do setor deverão investir fortemente em eficiência energética e tecnologias de produção mais limpa (P+L) para atender suas expectativas financeiras, bem como atender regulamentações ambientais que tendem a ser cada vez mais restritas. Neste cenário, há espaço para diversas abordagens, que podem envolver a adoção de novas estratégias de controle e planejamento da produção e melhora dos equipamentos já existentes adotando-se por exemplo melhor controle de queima de combustível para a fusão do alumínio secundário. Um grande salto em eficiência energética e P+L, porém, poderá vir da adoção de tecnologias inovadoras que reduzam o desperdício de recursos energéticos ao explorar fontes de calor anteriormente negligenciadas.

Apesar de relativa escassez de técnicas comercialmente comprovadas no âmbito das indústrias do alumínio, pode-se destacar uma em crescente uso: emprego de fornos do tipo torre na fusão do alumínio secundário, onde a carga é alimentada pela parte superior do forno. Encontra um fluxo de gases ascendente que provoca seu pré-aquecimento, aumentando a eficiência térmica de 30-35% em fornos revérberos comumente utilizados para 40-45% nos fornos tipo torre. Isto ocasiona também a redução na temperatura dos gases de exaustão de 1200°C para 150°C na mesma comparação (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2008). Esta tecnologia, porém, ainda encontra resistência de aplicação devido ao maior investimento inicial, maior custo de manutenção principalmente devido ao desgaste prematuro do material refratário do forno e necessidade de preparação da carga devido as características da alimentação do forno.

O presente estudo propõe uma abordagem distinta ao explorar uma fonte de calor geralmente negligenciada: o calor liberado durante a solidificação e o resfriamento do alumínio, que pode ser calculado com um balanço energético adotando a primeira lei da termodinâmica, discutido em maiores detalhes na seção 2.1.1. Este calor recuperado poderia representar uma parcela importante da energia

investida em um forno de fundição. Em indústrias de alumínio primário ou alumínio secundário de alta capacidade produtiva, o metal é vazado em moldes refrigerados à água em um circuito de refrigeração não pressurizado, o que limita a temperatura do fluxo em cerca de 90°C, sendo considerado de baixa qualidade para propósito de recuperação térmica industrial, mesmo considerando o alto aporte energético. Em indústrias de alumínio secundário de menor capacidade produtiva, os moldes são resfriados naturalmente ao ser expostos ao ar ambiente.

Embora existam alternativas propostas para o uso desta fonte de calor na forma como se apresenta, como por exemplo, aquecimento dos ambientes da indústria e residências próximas (NOWICKI e GOSSELIN, 2012) e uso de tecnologias de geração de eletricidade através de ciclo Rankine utilizando fluidos orgânicos (ALBERT, 2012), estas se mostram inócuas, considerando-se um país de clima quente como o Brasil e o alto custo de implementação associado à baixa eficiência térmica de um sistema de geração de eletricidade com baixa temperatura disponível (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2008). A alternativa que se propõe neste trabalho é utilizar o ar como meio de transporte de calor, e utilizá-lo diretamente na recuperação térmica em aplicações tais como pré-aquecimento de carga e aquecimento do ar de combustão. Esta abordagem possui as vantagens listadas a seguir:

- O ar pode atingir temperaturas elevadas sem oferecer riscos, sem geração de resíduos poluentes, facilmente bombeado e transportado.
- É aplicável também a processos que são carentes de outras formas de recuperação térmica, como no caso de fornos do tipo torre para ar de combustão e fornos elétricos à indução no pré-aquecimento da carga.
- Se utilizado no pré-aquecimento da carga, contribui para seu tratamento, removendo a umidade e outros compostos voláteis que podem representar riscos de operação no forno.
- Não demanda o uso de equipamentos complexos, o que pode mostrar-se como atrativo comercial.

Este trabalho visa investigar alguns parâmetros térmicos envolvidos na construção do sistema proposto, tais como temperaturas obtidas, coeficiente de transferência térmica e eficiência da extração de calor, comparando-se ao valor de energia disponível na solidificação e no resfriamento de um lingote com o obtido na

vazão de uma massa de ar conhecida. Estuda-se também as possíveis aplicações do ar aquecido em uma indústria de alumínio secundário e sua efetividade como técnica de recuperação térmica. Este trabalho pretende auxiliar no desenvolvimento de tecnologias industriais mais eficientes e limpas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo descreve os fundamentos teóricos e os aspectos tecnológicos de interesse associados ao assunto deste trabalho. Na seção 2.1 são abordados os fundamentos de termodinâmica e de transferência de calor envolvidos na solidificação de metais. Na seção 2.2 são discutidos aspectos a serem considerados na avaliação de potenciais técnicas de recuperação térmica. Na seção 2.3 são exploradas algumas das atuais técnicas para aumento de eficiência energética em indústrias de alumínio primário e secundário.

2.1 SOLIDIFICAÇÃO

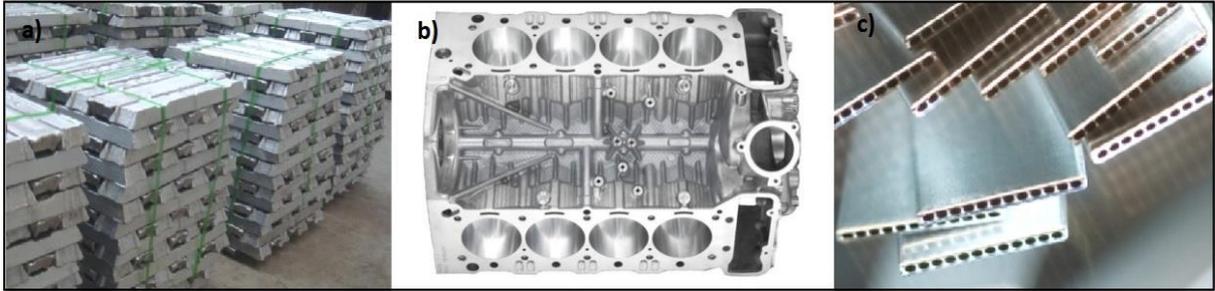
A solidificação é um fenômeno de transformação de fases bastante comum na vida cotidiana (p.e: na formação de gelo a partir da água líquida), estando também presente em processos de fabricação de peças metálicas. Não se conhece com precisão quando produziram-se as primeiras peças metálicas fundidas, mas indícios arqueológicos sugerem o período próximo à 5000 a.C., em um período que ficou conhecido como Idade do Bronze. Tal é a importância da manipulação dos metais, que sua descoberta define aspectos importantes no domínio tecnológico de civilizações e sua capacidade de prosperar.

Com a construção de fornos capazes de atingir níveis térmicos adequados à redução química dos minérios constituídos principalmente de óxidos metálicos, a humanidade passou a aprimorar técnicas de produção de peças. Com a fusão dos metais há uma queda abrupta da viscosidade, o que permite a sua acomodação em um molde de determinada geometria e proporciona, após solidificação, o formato de uma peça acabada ou semi-acabada (GARCIA, 2001). Já o lingotamento, que é abordado neste trabalho, consiste no vazamento do metal fundido em moldes de geometria mais simples, com formatos de seções quadradas, retangulares ou cilíndricas. O lingotamento pode ser utilizado para diferentes propósitos, dentre eles, como uma primeira etapa de um processo de conformação plástica (laminação, extrusão e forjamento), ou ainda, como meio de fornecer um formato adequado ao transporte e comercialização de ligas metálicas padronizadas para atender diferentes demandas da indústria metalúrgica (CAMPOS FILHO e DAVIES, 2008).

Por questões econômicas e práticas, diferente dos processos de fundição de peças que pode ocorrer em moldes não permanentes, ou seja, colapsados para extração da peça, o lingotamento ocorre em moldes permanentes chamados lingoteiras ou coquilhas, que podem receber inúmeros vazamentos em sua vida útil. Os moldes podem ser construídos em material metálico ou cerâmico, dependendo da sua capacidade de resistir às temperaturas e aos gradientes térmicos envolvidos, bem como, da interação química com o metal fundido. Os processos incluem lingotamento contínuo e lingotamento estático. No processo de lingotamento contínuo, que consiste em fabricar peças de seção constante, mas de grande comprimento e adequados a posteriores etapas de conformação plástica, é necessário solidificar o metal rapidamente e de forma contínua. Para tal, emprega-se o uso de um molde refrigerado a água capaz de gerar uma camada sólida suficientemente espessa no metal vazado que deverá resistir à pressão interna do metal líquido e as tensões mecânicas da extração do lingote. Em seguida, o lingote abandona o contato com o molde e é resfriado diretamente por sprays de água ou jatos de ar em uma longa etapa que visa garantir uma extração de calor controlada, de forma a garantir requisitos de qualidade do produto (GARCIA, 2001).

No lingotamento estático, o metal líquido é vazado em um molde, acomoda-se em sua cavidade, troca calor com o molde e solidifica-se, sendo necessário que o formato deste molde permita a posterior extração da peça sólida. O lingotamento estático pode ocorrer com resfriamento do conjunto metal/molde de forma natural, sendo o calor rejeitado para o ambiente através de convecção livre e radiação, ou ainda com o uso de convecção forçada, empregando fluxo de ar ou água na superfície externa do molde a depender do volume de produção esperado (intervalo entre vazamentos) e características microestruturais do material dependentes de sua taxa de resfriamento. Uma máquina de lingotamento estático refrigerada a água é exibida no Anexo 1 deste trabalho. No caso particular da produção de lingotes destinados a uma posterior refusão, da qual este trabalho delimita-se, a microestrutura do produto obtido não é relevante. A Figura 1 apresenta diferentes produtos obtidos através do processo de solidificação do alumínio.

Figura 1 - a- Lingotes padronizados destinados à refusão; b- Bloco de motor solidificado em molde não permanente; c- perfil extrudado a partir de lingote.



Fonte: Adaptado de Albert (2011).

2.1.1 Termodinâmica da solidificação

2.1.1.1 O ponto de fusão

Um metal ou liga metálica pode existir, tanto em sua forma sólida cristalina, quanto como líquido, apresentando-se uma temperatura de fusão T_f acima da qual a forma estável é líquida e, abaixo desta, é sólida. Esta temperatura, também conhecida como “ponto de fusão” é a única em que as duas fases podem coexistir em equilíbrio. Embora na maioria das situações práticas seja considerada constante, T_f varia com a pressão. A aplicação de pressão favorece a formação da fase de menor volume, que para metais (com poucas exceções) é a fase sólida. Portanto, o aumento da pressão tem, como efeito, o incremento do ponto de fusão para a maioria dos metais (GARCIA, 2001), conforme a equação de Clapeyron (Eq. (1)):

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta P}\right)_{sat} = \frac{T_f(V_2 - V_1)}{L} \quad (1)$$

onde ΔP é a variação de pressão [Pa]; ΔT a variação da temperatura de fusão [K]; V_1 e V_2 são os volumes específicos de cada fase [m^3/kg]; T_f é a temperatura de fusão [K]; L é o calor latente de fusão [J/kg].

O calor latente de fusão define-se como o calor liberado na transformação da fase sólida para líquida. A energia interna do líquido desordenado é maior do que a necessária para a ordenação da fase sólida cristalina, e uma liberação ou absorção de calor deve acontecer quando o material atravessa de um estado a outro.

Outra abordagem pode ser usada para definir o ponto de fusão como sendo

a temperatura na qual as energias livres F das duas fases são iguais, $F_l = F_s$. Ou seja, as fases tem a mesma capacidade de realizar trabalho. A energia livre de uma fase pode ser definida pela Eq. (2):

$$F = E - TS + PV \quad (2)$$

onde E é a energia interna da fase [J]; T é a temperatura absoluta [K]; S é a entropia [J/K]; P a pressão [Pa] e V o volume [m³]. Fazendo a consideração de entalpia de uma fase como sendo:

$$H = E + PV \quad (3)$$

e o calor latente de fusão como:

$$L = H_l - H_s \quad (4)$$

e igualando a energia livre da fase líquida com a sólida a uma mesma temperatura T_f , tem-se, ao fazer a substituição das Eqs. (3) e (4) na Eq. (2):

$$\Delta S = \frac{L}{T_f} = S_l - S_s \quad (5)$$

A Eq. (5) mostra que a variação de ordenação (entropia) que ocorre na transformação das fases pode ser relacionada com a relação entre o calor latente de fusão e a temperatura de fusão. Tendo em consideração que a diferença de ordenação cristalina entre diferentes metais ou ligas metálicas é muito inferior à variação de ordenação entre um líquido e um sólido, a variação de entropia ΔS na mudança de fases não é fortemente dependente da configuração cristalina do sólido (GARCIA, 2001).

2.1.1.2 Superaquecimento e Super-resfriamento

Em situações práticas onde se deseja que o metal fundido assuma o formato de seu molde, é necessário que haja um excedente de temperatura em relação ao ponto de fusão, a fim de que exista tempo hábil para o líquido preencher todas as cavidades, reentrâncias do molde e seus canais de alimentação antes de iniciar a solidificação. A esta diferença entre a temperatura de vazamento e o ponto de fusão dá-se o nome de superaquecimento, descrita pela Eq. (6):

$$\Delta T_v = T_v - T_f \quad (6)$$

onde ΔT_v é o superaquecimento [K]; T_v a temperatura de vazamento [K]; T_f a temperatura de fusão [K].

Considerando-se o caso onde não haja superaquecimento, o calor a ser transferido ao molde e/ou ambiente para que ocorra solidificação é expresso pela Eq. (7):

$$Q = mL \quad (7)$$

onde Q representa o calor a ser transferido [J]; m a massa do material [kg] e L o calor latente de fusão [J/kg].

No uso de vazamento com superaquecimento, à Eq. (7) deve ser adicionado o calor sensível do metal líquido no intervalo ΔT_v , conforme Eq. (8):

$$Q = mC_l(T_v - T_f) + mL \quad (8)$$

onde C_l é o calor específico do metal na fase líquida [J/kg.K].

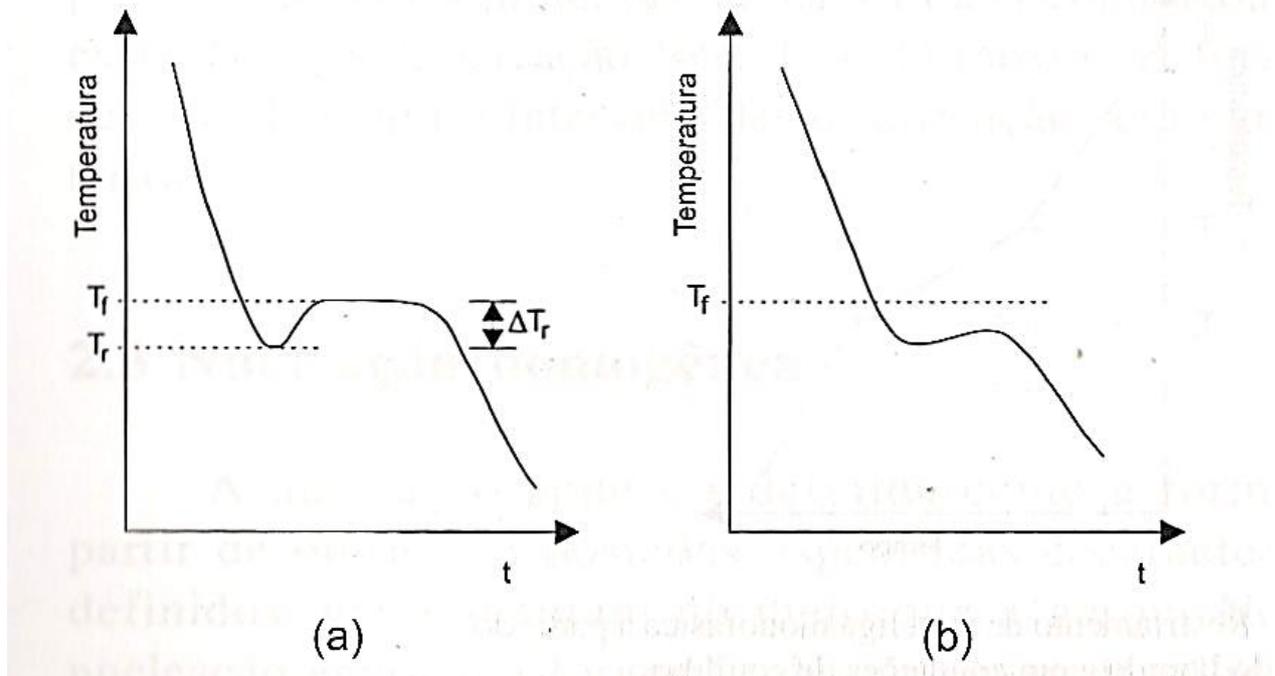
Embora possa assumir-se que as fases passam por transformação exatamente no ponto de fusão, na prática observa-se frequentemente a nucleação de partículas sólidas a temperaturas inferiores à T_f (MÜLLER, 2002). Este fenômeno é denominado de super-resfriamento, com a sua magnitude sendo expressa pela Eq. (9):

$$\Delta T_r = T_f - T_r \quad (9)$$

onde ΔT_r é o super-resfriamento [K] e T_r a temperatura de super-resfriamento [K].

Na Figura 2 ilustram-se duas curvas de resfriamento que apresentam casos distintos de super-resfriamento.

Figura 2 - Curvas de resfriamento apresentando super-resfriamento.



Fonte: Adaptado de Garcia, 2001.

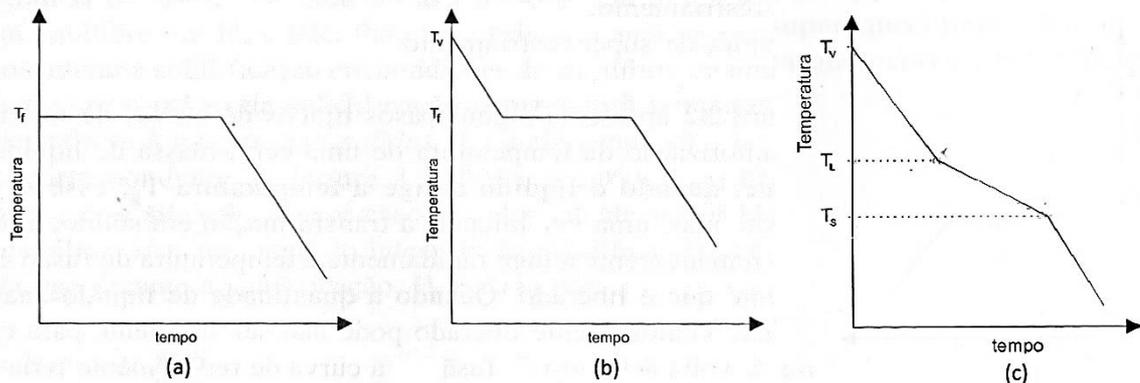
No caso (a), o líquido resfria-se até a temperatura T_r , atingindo a condição de super-resfriado. A temperatura do líquido volta a subir rapidamente devido a liberação do calor latente da porção em transformação para sólido. No caso (b), a quantidade de líquido é muito pequena e o calor latente liberado insuficiente para conduzir a temperatura de volta ao ponto de fusão.

2.1.1.3 Intervalo de solidificação

A grande maioria das aplicações industriais envolvem o uso de ligas metálicas compostas de dois ou mais elementos, o que permite um amplo espectro de propriedades físicas e mecânicas para a seleção do material mais adequado. Para estas condições, é necessário considerar o equivalente do ponto de fusão para uma liga. Para tanto, considera-se a composição química com o uso de diagramas de equilíbrio de fases e também as condições em que ocorre a solidificação com o uso de curvas de resfriamento. O calor latente nestes casos, não é liberado em uma única

temperatura, mas ao longo de um intervalo de solidificação ΔT (GARCIA, 2001). A Figura 3 ilustra curvas de resfriamento para diferentes situações: a) Metal puro sem superaquecimento; b) Metal puro com superaquecimento c) Liga monofásica, em que o intervalo de solidificação tem início na temperatura *liquidus* T_l e tem fim à temperatura *solidus* T_s .

Figura 3 - Curvas de resfriamento para a) metal puro sem superaquecimento, b) metal puro com superaquecimento, c) Liga monofásica com superaquecimento.



Fonte: Adaptado de Garcia, 2001.

2.1.2 Transferência de calor na solidificação

A solidificação dos metais pode ser considerada como um processo de transferência de calor no regime transitório. A fronteira que se forma entre as fases sólida e líquida, com propriedades térmicas distintas, está em movimento em direção ao centro do lingote enquanto energia térmica é liberada durante todo o processo. O objetivo da análise de transferência de calor na solidificação consiste essencialmente em determinar a cinética da solidificação e a distribuição de temperatura no sistema metal/molde (MÜLLER, 2002).

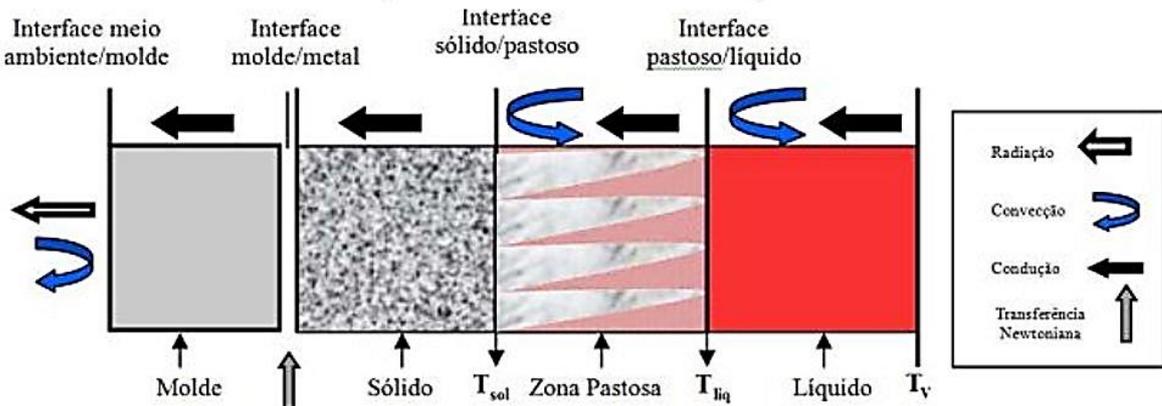
Como já abordado na Eq. (8), o calor liberado em um processo de solidificação com superaquecimento corresponde à soma do calor sensível do líquido e a liberação do calor latente na fronteira de sólido/líquido. Este calor deve ser transferido através do metal já solidificado, na interface metal/molde e no interior do molde. Em cada uma das etapas, o processo encontra uma resistência térmica. Se a massa do molde não for suficiente para absorver todo o calor transferido na solidificação, o exterior do molde deve também trocar calor com o ambiente.

Nos processos de lingotamento ou fundição de peças, o uso de diferentes tipos de molde permite que alguns destes processos de transferência de calor transitórios possam ser desprezados frente ao cômputo global do transporte de energia do sistema. Pode-se por exemplo, dimensionar-se moldes metálicos ou coquilhas de forma que possam absorver todo o calor de solidificação, apresentando aquecimento em seu exterior somente nos instantes finais do processo. Desta forma, a transferência de calor para o ambiente pode ser desprezada. Estes tipos de molde são denominados semi-infinitos e não encontram grandes aplicações na indústria de fundição devido à baixa viabilidade econômica que oferecem, pois é necessário um grande volume de material no molde quando comparado ao volume da peça produzida (GARCIA, 2001). Já os moldes refrigerados podem ser construídos com menor volume e têm sua temperatura externa mantida em relativa constância pela ação de um fluido refrigerante mantido em circulação, e oferecem uma alternativa mais viável.

2.1.2.1 Modos de transferência de calor

O calor é transferido através de três mecanismos: condução, convecção e radiação. Na solidificação de um metal contido por um molde, a condução ocorre nos volumes sólidos, sendo eles o metal solidificado e o interior do molde. A convecção pode ser observada nas perdas de calor da superfície externa do molde ao ambiente, em uma eventual superfície exposta do material em solidificação para o ambiente e com a tendência do metal líquido remanescente manter equilíbrio térmico com movimentos convectivos. A radiação também é associada às trocas térmicas com o ambiente, e torna-se importante em casos de ponto de fusão elevado, bem como no caso de saturação e aquecimento rápido das paredes externas do molde. Na interface entre o metal e o molde, também existe uma resistência térmica de contato, agravada por uma fresta que decorre da contração do metal solidificado, conhecida na literatura como *air-gap* (ROCHA, FILHO, *et al.*, 2013). O modo de transferência de calor envolvendo esta resistência é conhecido como mecanismo de transferência newtoniana. A Figura 4 ilustra os modos de transferência de calor em um sistema de solidificação unidirecional.

Figura 4 - Mecanismos de transferência de calor em um sistema de solidificação unidirecional



Fonte: Rocha, Filho, *et al*, 2013.

• Condução

A condução térmica ocorre principalmente no interior de sólidos, onde o movimento dos átomos é restringido, e pode acontecer nos regimes permanente ou transiente. Na solidificação dos metais prevalece o regime transitório, porém faz-se necessária uma análise do regime permanente para um entendimento do transiente. Na Figura 5 (a) pode-se observar um gráfico de temperatura em função da posição de um sistema unidirecional com condução em regime permanente. Nota-se que a temperatura na região $x = S$ é mais elevada do que na região $x = 0$, de tal forma que o calor é conduzido da direita para a esquerda, de acordo com a Eq. (10):

$$q_k = -\frac{k}{S}(T_l - T_0) \quad (10)$$

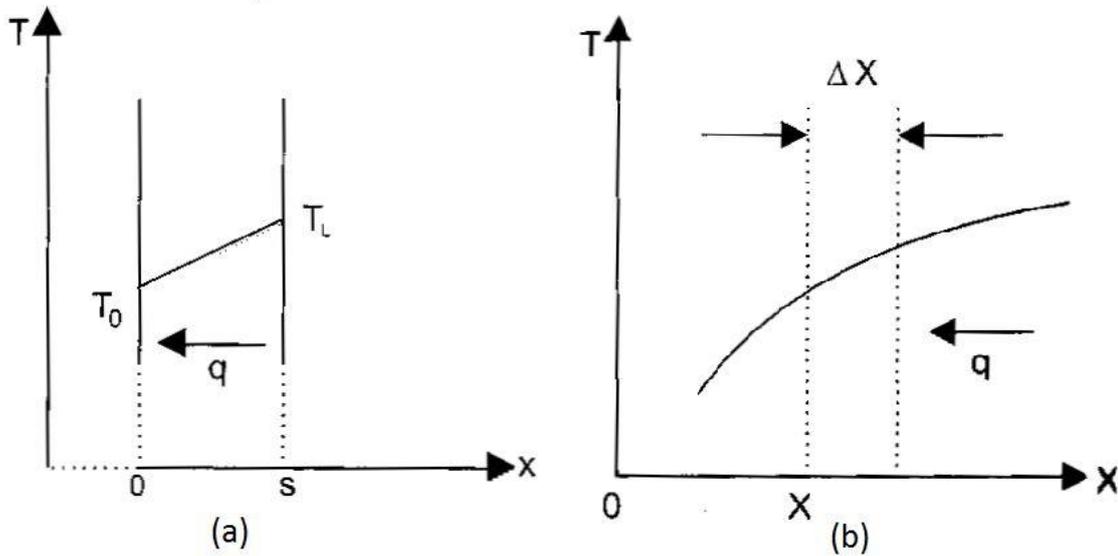
onde q_k é o fluxo de calor [W], k é a condutividade térmica do material [W/m.K], S é a espessura da região em análise [m], e T_l e T_0 são as temperaturas em cada extremo da região [K]. A Eq. (10) tem origem na Lei de Fourier:

$$q_k = -k\left(\frac{dT}{dx}\right) \quad (11)$$

onde dT/dx é o gradiente de temperatura no espaço [K/m].

Quando o fluxo de calor ocorre em regime transiente, a distribuição de temperatura se apresenta na forma não-linear da Figura 5 (b).

Figura 5 - Perfis térmicos de um sistema unidirecional de condução em regime: (a) permanente; (b) transitório.



Fonte: Adaptado de Garcia, 2001.

Em um material de espessura Δx , o calor conduzido para dentro do material através da superfície em $x + \Delta x$ é menor que o calor conduzido para fora do elemento em x , e usando o princípio de conservação de energia, pode-se considerar:

$$A q_x = A q_{x+\Delta x} + A \Delta x \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

onde A é a área de troca térmica [m^2], ρ é a densidade do material [kg/m^3], c é o calor específico [$J/kg.K$] e $\partial T / \partial t$ é a taxa de resfriamento [K/s]. Dividindo os dois lados da igualdade por $A \cdot \Delta x$ e derivando, tem-se:

$$\frac{\partial q}{\partial x} = - \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (13)$$

combinando as equações (12) e (13), tem-se:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (14)$$

onde $a = k/c\rho$ [m^2/s] é a difusividade térmica (GARCIA, 2001).

- **Convecção**

Quando um sólido aquecido é posto em contato com um fluido em movimento, a taxa de calor removida do sólido deverá ser maior do que a experimentada com um fluido estacionário. Este mecanismo de troca térmica é conhecido como convecção e pode ocorrer de forma natural quando o movimento de fluido é provocado pelos gradientes de densidade que decorrem de seu próprio aquecimento, ou ainda quando existe movimento induzido do fluido, neste caso denomina-se convecção forçada. A avaliação quantitativa da convecção depende da velocidade do fluido, de suas propriedades termo físicas e da geometria da superfície sólida (CAMPOS FILHO e DAVIES, 2008). O fluxo de calor transmitido por convecção q_{conv} pode ser expresso pela Eq. (15):

$$q_{conv} = h_{conv}(T_s - T_{\infty}) \quad (15)$$

onde T_s é a temperatura de superfície [K], T_{∞} é a temperatura de corrente livre [K], ou seja, a temperatura do fluido em uma zona sem influência da superfície aquecida, e h_{conv} é o coeficiente de transferência de calor por convecção [$W/m^2.K$].

Para geometrias simples, existe a possibilidade da determinação do coeficiente h_{conv} de forma analítica. Porém, em situações complexas, torna-se necessário o uso de ferramentas empíricas, tais como gráficos e tabelas disponíveis na literatura, modelos computacionais adequados ou ainda dados experimentais.

- **Radiação**

Enquanto a condução e a convecção dependem de meios físicos para o transporte de energia, o calor também pode ser transferido em sua ausência através de ondas eletromagnéticas, principalmente na região do espectro que compreende o infravermelho, a luz visível e o ultravioleta. Este mecanismo é denominado de radiação térmica e o fluxo de calor q_{rad} pode ser quantificado pela lei de Stefan-Boltzmann, conforme a Eq. (16):

$$q_{rad} = \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (16)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), ε é a emissividade da superfície [adimensional], T_s é a temperatura da superfície [K], e T_{viz} é a temperatura da vizinhança com a qual é realizada a troca de calor [K]. Em casos mais complexos há a necessidade de se incorporar a esta equação um fator de forma geométrica (INCROPERA, LAVINE, *et al.*, 2011).

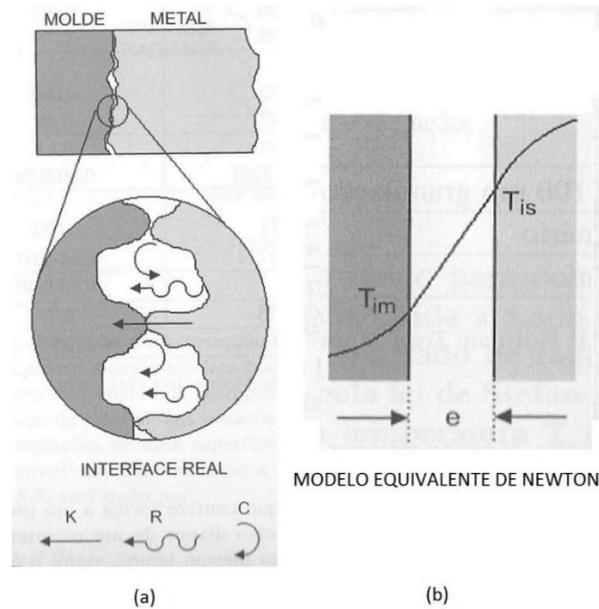
- **Resistência de contato na fronteira metal-molde**

A solidificação confere forma a uma peça metálica a partir de uma massa líquida contida em um recipiente que ao mesmo tempo deve conferir esta geometria e retirar o calor liberado na transformação de fases. O metal líquido ao ser vazado entra em contato com as paredes do recipiente e, na fronteira metal/molde, existirá uma resistência térmica de contato. Este parâmetro é de grande importância para a determinação das taxas de solidificação, para a microestrutura resultante e para as propriedades mecânicas obtidas, bem como para o dimensionamento de um sistema refrigerado.

Esta resistência é decorrente dos seguintes fatores: Afinidade físico-química imperfeita entre os materiais em contato, que traz como consequência o molhamento incompleto da parede interna do molde pelo líquido; condições superficiais do molde, como a rugosidade, que geram uma microgeometria limitando os pontos de contato na interface; temperaturas iniciais do metal vazado e do molde; presença de materiais desmoldantes que geram uma película de separação entre metal e molde; configuração geométrica do molde que afete a pressão metalostática no contato; tipos de gases que preenchem o *air-gap* formado; contração do metal solidificado à medida que resfria e expansão do material do molde à medida que esquenta, aumentando a separação na interface metal-molde (MÜLLER, 2002) (TAHA , EL-MAHALLAWY, *et al.*, 2001).

A transferência de calor nesta região de interface dá-se por condução nos pontos de contato físico, e por convecção natural e radiação nas regiões de separação entre superfícies. A Figura 6 mostra os mecanismos de troca de calor em uma região de interface metal-molde (Fig. 6a) e o perfil de temperaturas no modelo equivalente de newton (Fig. 6b).

Figura 6 - (a) Mecanismos de troca térmica na fronteira metal/molde; (b) Modelo equivalente de newton.



Fonte: Adaptado de Garcia, 2001.

A determinação analítica do coeficiente de troca térmica de contato da interface metal/molde é uma tarefa complexa, devido aos muitos fatores de influência anteriormente apresentados. Há a possibilidade de modelar esta resistência como uma transferência newtoniana, que consiste em admitir que as duas superfícies de troca térmica são perfeitamente planas e paralelas, separadas por uma camada de um determinado gás por uma distância conhecida (GARCIA, 2001). Para estas condições, o fluxo de calor unidirecional entre metal e molde q_N pode ser escrito pela Eq. (17):

$$q_N = \frac{K_g}{e} (T_{is} - T_{im}) \quad (17)$$

onde K_g é a condutividade térmica do gás [W/mK], e é a espessura da camada de gás [m], T_{is} e T_{im} as temperaturas das superfícies do metal e do molde, respectivamente [K]. A Eq. (17) também pode ser reescrita como:

$$q_N = h_i (T_{is} - T_{im}) \quad (18)$$

onde h_i é o coeficiente de troca de calor na interface metal/molde [W/m².K].

Frequentemente, adota-se em modelos analíticos, como hipótese simplificadora, um coeficiente h_i constante. Entretanto, nas situações práticas ocorre uma sensível variação deste parâmetro do início ao fim do processo de solidificação e resfriamento da peça (TAHA , EL-MAHALLAWY, *et al.*, 2001). Esta variação pode ser dividida em três fases distintas: 1- No primeiro estágio, quando o metal ainda é líquido, h_i atinge seu máximo valor. Neste estágio a influência da rugosidade superficial, viscosidade do metal líquido, superaquecimento do metal e pré-aquecimento do molde são os parâmetros mais importantes. 2- O segundo estágio começa assim que a temperatura *liquidus* da liga ou temperatura de fusão do metal puro é atingido e uma fina camada sólida começa a se formar, com o contato na interface tornando-se inferior pela formação de um *air-gap*. Como resultado, o coeficiente h_i começa a decair. A pressão metalostática, ou seja, a força exercida pelo próprio peso do metal, pode reduzir a intensificação da formação do *air-gap*, a depender da geometria e tamanho da peça; 3- O terceiro estágio, caracterizado pela formação de um *air-gap* contínuo, começa quando a camada sólida é forte o suficiente para resistir à pressão metalostática. Neste estágio o efeito dos materiais envolvidos, o tipo e espessura do molde são os parâmetros mais importantes.

A determinação analítica dos parâmetros de transferência de calor em moldes finitos com resistência térmica na interface metal/molde é complexa por não existir solução matemática exata para o problema, por falta de condições de contorno suficientemente estáveis (GARCIA, 2001). Metodologias numéricas são cada vez mais utilizadas, porém ainda dependem de confronto experimental para validação. Dispõe-se na literatura com relativa escassez os valores de h_i , devido à alta diversidade dos sistemas metal/molde, o que implica na necessidade do desenvolvimento de metodologias experimentais para sua determinação (ROCHA, FILHO, *et al.*, 2013). Podem-se citar algumas técnicas: Análise da cinética de solidificação em um sistema unidirecional de forma controlada; confronto com perfis térmicos obtidos em modelos teóricos/experimentais; medidas de parâmetros da microestrutura de solidificação; medida de temperatura e vazão em moldes refrigerados.

2.1.2.2 Analogia com um circuito elétrico

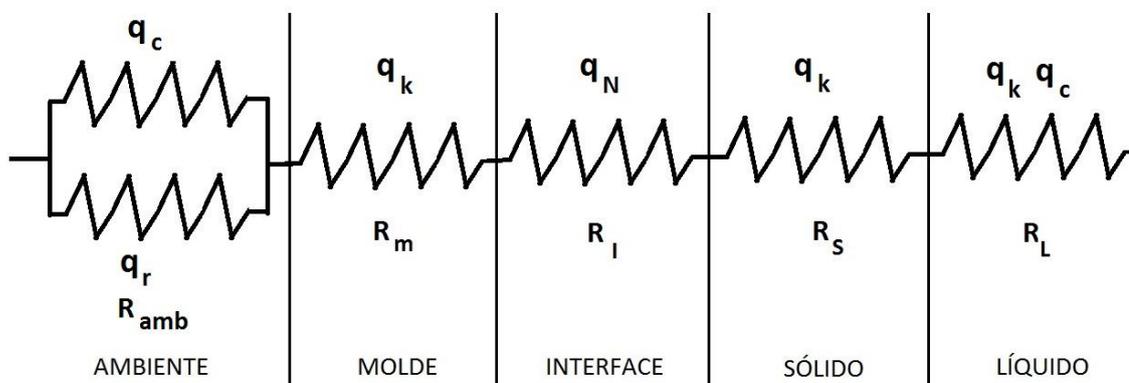
Na análise da transferência de calor do processo de solidificação, pode ser útil a utilização de uma analogia do circuito térmico com o circuito elétrico equivalente. Nesta analogia, a taxa do calor transferido por área (fluxo térmico), pode ser representada como uma corrente elétrica. A combinação de condutividade térmica e a espessura joga o papel de uma resistência a este fluxo, e o gradiente de temperatura, de uma força motriz para o fluxo de calor, similar à tensão elétrica. Desta forma, uma relação semelhante à lei de Ohm para circuitos elétricos pode ser observada, como apresentada pela equação (19):

$$q = \frac{\Delta T}{R_t} \sim i = \frac{\Delta V}{R_e} \quad (19)$$

sendo q o fluxo de calor [W], ΔT o gradiente de temperatura [K], R_t a resistência térmica [K/W]. De forma análoga, i é a corrente elétrica [A], ΔV a tensão ou potencial elétrico [V] e R_e a resistência elétrica [Ω].

Para um sistema metal/molde pode ser considerado um circuito térmico que avalia a resistência térmica total equivalente R_T do centro do lingote à temperatura de vazamento T_v até a temperatura do ambiente T_0 , conforme ilustrado pela Figura 7 e indicado pela Eq. (20).

Figura 7 - Circuito térmico equivalente de um sistema metal-molde.



Fonte: Autoria Própria

$$R_T = R_{amb} + R_m + R_i + R_S + R_L \quad (20)$$

onde, R_{amb} é a resistência térmica da superfície externa do molde ao meio ambiente, podendo ser reescrita como $R_{amb} = 1/h_{amb}$ onde h_{amb} é o coeficiente de transferência de calor equivalente entre molde e ambiente, dado pela soma $h_{amb} = h_c + h_r$ dos coeficientes convectivos e radiantes, respectivamente;

R_m é a resistência térmica do molde, dado pela relação da espessura do molde e sua condutividade térmica $R_m = e_m/K_m$;

R_i é a resistência térmica da interface metal/molde, dado pelo inverso do coeficiente de calor na interface $R_i = 1/h_i$;

R_S a resistência térmica da camada solidificada do lingote, dado pela relação entre a espessura de sólido formada e sua condutibilidade térmica $R_S = S/K_S$;

R_L é a resistência térmica da porção líquida, que considera a condução térmica no líquido de espessura L e a convecção na interface sólido/líquido do lingote $R_L = L/(K_L + h_c \cdot L)$.

Para moldes refrigerados, admitindo o fluido de refrigeração ser renovado de forma constante e a troca térmica dar-se de forma eficiente, considera-se que há uma capacidade infinita de absorção de calor e como consequência uma resistência térmica R_m desprezível frente às outras resistências do sistema (CAMPOS FILHO e DAVIES, 2008), como exprime a Eq. (21):

$$R_m \ll R_i + R_S + R_L \quad (21)$$

Conforme discutido nas seções anteriores, há escassez de valores de coeficientes de troca térmica na literatura devido à grande variação dos sistemas metal/molde (GARCIA, 2001). A aplicação tecnológica de moldes refrigerados de maior uso é o processo de lingotamento contínuo, onde é de grande importância o conhecimento da capacidade de extração de calor do molde para que possa se analisar a evolução do processo de solidificação, devido à necessidade de formação de uma camada sólida suficientemente espessa para suportar a pressão do metal líquido e as tensões mecânicas da extração do lingote. Moldes refrigerados também

são utilizados em processos de lingotamento estático, com o propósito de diminuir o intervalo entre vazamentos. A metodologia experimental de medidas de temperatura e vazão atende a ambas aplicações.

2.1.2.3 Coeficiente global de transferência de calor

A resistência térmica mais significativa para sistemas metal/molde refrigerados é a de contato R_i , porém as demais resistências apresentam dificuldade de avaliação individual, de forma que o procedimento mais adequado consiste na determinação de um coeficiente global de transferência de calor U , correspondente à soma do inverso de todas as resistências térmicas envolvidas (GARCIA, 2001). A medida de algumas temperaturas do sistema, bem como a medida de vazão mássica do fluido de refrigeração permite determinar o coeficiente U através de um balanço térmico apropriado, mediante a Eq. (22):

$$q = U \cdot A_t (T_s - T_{mf}) = \dot{m}_f \cdot C_p (T_{sai} - T_{ent}) \quad (22)$$

onde q é o fluxo de calor extraído do sistema [W]; A_t é a área de troca térmica [m²]; T_s a temperatura de superfície externa do molde [K]; T_{mf} é a temperatura média do fluido de refrigeração [K]; \dot{m}_f é a vazão mássica do fluido [kg/s]; C_p é o calor específico do fluido [J/kg.K]; T_{sai} é a temperatura do fluido na saída do circuito de refrigeração [K]; T_{ent} a temperatura de entrada do fluido [K].

Uma aproximação do sistema metal/molde refrigerado como um sistema de convecção em escoamento interno com o fluido entrando a uma temperatura constante leva a necessidade de considerar que a diferença entre a temperatura de superfície e a temperatura média do fluido $\Delta T = (T_s - T_{mf})$, possui decaimento exponencial à medida que o fluido percorre a região de troca térmica até sua saída (INCROPERA, LAVINE, *et al.*, 2011). Portanto, é adequado adotar-se um diferencial de temperatura médio logarítmico ΔT_{ml} . O lado direito da Eq. (22) torna-se:

$$q = U \cdot A_t \cdot \Delta T_{ml} \quad (23)$$

sendo ΔT_{ml} definido como:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_{sai} - \Delta T_{ent}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{sai}}{\Delta T_{ent}}\right)} \quad (24)$$

onde ΔT_{sai} é a diferença de temperatura entre a superfície de troca térmica e a temperatura de saída do fluido, $\Delta T_{sai} = T_s - T_{sai}$ [K]; ΔT_{ent} é a diferença de temperatura entre a superfície e a temperatura de entrada do fluido, $\Delta T_{ent} = T_s - T_{ent}$ [K].

Desta forma, a Eq. (22), combinada com a Eq. (23), fornece:

$$U = \frac{\dot{m}_f \cdot C_p (T_{sai} - T_{ent})}{A_t \cdot \Delta T_{ml}} \quad (25)$$

A Eq. (25) permite quantificar a capacidade de extração de calor do molde refrigerado a partir do conhecimento da vazão mássica do fluido e das temperaturas de entrada e saída do fluido, bem como da temperatura de superfície de troca térmica. A área de superfície pode ser determinada através de medição do molde e o calor específico deve ser avaliado em sua variação com as temperaturas envolvidas, podendo adotar-se um valor médio para melhor aproximação.

2.2 RECUPERAÇÃO TÉRMICA

A calor desperdiçado refere-se à energia gerada em processos industriais que não é colocada em uso prático. Fontes de calor desperdiçado incluem gases aquecidos de combustão descarregados na atmosfera, produtos aquecidos saindo de processos industriais e transferência de calor a partir de superfícies aquecidas dos equipamentos. A quantidade exata de calor perdido na indústria é desconhecida, com estimativas que variam de 20% a 50% de todo consumo energético transformado em calor desperdiçado (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2008). Enquanto o desperdício de calor em alguns processos são inevitáveis, tecnologias podem ser implementadas na indústria para melhorar a eficiência dos equipamentos, seja através de melhor controle nos processos, ou ainda, do uso de tecnologias de recuperação de calor. Alguns exemplos de uso do calor desperdiçado incluem geração de eletricidade, pré-aquecimento do ar de combustão, pré-aquecimento de cargas, refrigeração por absorção e aquecimento de ambientes. Tecnologias de recuperação

térmica frequentemente reduzem o custo operacional das indústrias por aumentar a eficiência energética. Muitas tecnologias já foram desenvolvidas e comprovadas, porém devido a uma combinação de fatores técnicos e de mercado, barreiras são impostas para sua adoção de forma mais difundida.

A recuperação do calor desperdiçado pode ser obtida através de vários métodos. O calor pode ser “reutilizado” dentro do mesmo processo ou ainda encaminhado a outros processos de forma a reduzir ou ainda eliminar a necessidade de adicionar-se mais energia nos sistemas. O pré-aquecimento do ar de combustão, por exemplo, pode aumentar a eficiência de queimadores em até 50%, e é uma técnica já bastante utilizada em sistemas de geração de vapor. Outras vantagens do uso deste calor incluem a eliminação de equipamentos adicionais, como por exemplo a não necessidade de outro queimador de menor capacidade quando se usa o calor oriundo de um queimador maior, e a redução nas emissões de gases de efeito estufa, através da economia de uso de energia elétrica ou de combustíveis.

2.2.1 Fatores que afetam a viabilidade da recuperação térmica

Avaliar a viabilidade da recuperação de calor desperdiçado requer a caracterização da fonte térmica e do meio em que este calor será transportado. Os parâmetros mais importantes a serem determinados são: Quantidade de calor, temperatura, composição e materiais envolvidos, temperatura mínima permitida e o efeito sobre a logística do processo (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2008).

A quantidade de calor refere-se à medida da energia contida em um fluxo de calor desperdiçado, enquanto que a qualidade retrata o potencial de utilidade da fonte térmica. A quantidade de calor desperdiçada pode ser avaliada segundo a Eq. (26):

$$\dot{Q} = \dot{m}h(T) \quad (26)$$

onde \dot{Q} é o fluxo de calor [W], \dot{m} é a vazão mássica do meio de transmissão de calor [kg/s] e $h(T)$ é a entalpia específica [J/kg] em função da variação de temperatura. A entalpia deve ser avaliada em relação a um estado padrão, sendo as condições de temperatura e pressão do ambiente, ou ainda o valor da menor temperatura admissível para o processo.

Embora este seja um parâmetro importante, não é a única medida para avaliar a oportunidade de recuperação térmica. A temperatura é um fator chave para se determinar a viabilidade da recuperação, pois pode variar drasticamente. Processos de resfriamento a água em circuitos não pressurizados podem retornar grandes quantidades de calor a baixas temperaturas (40°C – 90°C), enquanto outros processos podem levar a elevadas temperaturas, porém, com baixo fluxo de calor. Para permitir a recuperação de calor é necessário que a fonte de calor desperdiçado tenha temperatura superior à demandada pelo processo que receberá calor, pois esta medida determina diretamente a utilidade ou “qualidade” da recuperação. Esta diferença de temperatura influenciará a taxa de transferência de calor por unidade de área nos trocadores de calor, ou ainda, a máxima eficiência teórica de uma máquina térmica alimentada por esta fonte (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2008).

O meio em que o calor desperdiçado é transportado também determina a viabilidade da recuperação de calor. Embora a composição química não influencie de forma direta a quantidade e qualidade do calor, afetará a escolha e dimensionamento de trocadores de calor, bem como a escolha dos materiais envolvidos. A composição e fase do meio determinam fatores como condutividade térmica e capacidade calorífica que impactam a eficiência do trocador de calor (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2008).

A mínima temperatura permitida é relacionada principalmente a condições problemáticas que possam surgir do resfriamento do meio onde o calor é recuperado. Na recuperação de calor de gases de combustão de fornos, por exemplo, a temperatura não deve ser baixa o suficiente para condensação de água, pois a depender do combustível utilizado esta água condensada conterá elementos corrosivos tais como enxofre e óxidos de nitrogênio, acarretando em graves problemas de corrosão em materiais comuns. A adoção de materiais com maior resistência à corrosão, uso de combustíveis mais limpos, manutenções constantes ou outras medidas de contenção podem mostrar-se custosas ao ponto de inviabilizar a recuperação de calor (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2008).

Por fim, diversos fatores adicionais referentes à logística dos processos podem determinar a viabilidade da recuperação de calor. Plantas de pequena capacidade podem encontrar dificuldades em reunir capital para investimento e os períodos de retorno para estes investimentos podem ser demasiadamente longos. Cronogramas de operação também podem apresentar problemas, pois se a fonte de

calor desperdiçado só é disponível por uma quantidade limitada de tempo por dia, pode ocorrer falta de sincronia entre oferta e demanda de calor, e também equipamentos poderão apresentar fadiga por dilatação e contração devido ao ciclo térmico excessivo. Adicionalmente, limitações físicas criadas pelo arranjo dos equipamentos impedem acesso fácil à fonte de calor ou instalação de novos sistemas, bem como as distâncias envolvidas. Outro fator é a capacidade de transporte de calor, sendo a possibilidade de encanar um fluxo líquido ou gasoso facilitado em relação ao transporte de material sólido aquecido (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2008).

2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO

2.3.1 Alumínio primário

Graças a uma combinação de propriedades de grande interesse, tais como leveza, resistência mecânica, alta condutividade térmica e elétrica, resistência à corrosão, usinabilidade, conformabilidade e capacidade de reciclagem, ligas de alumínio encontram grande aplicação como material de escolha em diversas indústrias. Em 2016 (INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE, 2017), 59 milhões de toneladas de alumínio primário (proveniente da redução do óxido de alumínio) foram produzidas no mundo, principalmente na China (31 milhões de toneladas), Rússia (3,5 milhões de toneladas) e Canadá (3,25 milhões de toneladas). O Brasil é o 11º maior produtor de alumínio primário, com de cerca de 790 mil toneladas distribuídas em seis plantas no ano de 2016, e é o 3º maior produtor de alumina, o principal insumo para produção de alumínio primário, com 6,7 milhões de toneladas no mesmo ano.

A produção de alumínio a partir do processo de redução química requer grande demanda energética devido à quebra da ligação química entre alumínio e oxigênio. O consumo de energia para o beneficiamento da bauxita em alumina, o principal minério envolvido em sua produção, foi de cerca de 3,1 MWh/ton na média mundial em 2016. Para a transformação da alumina em alumínio metálico, a demanda foi de cerca de 14,3 MWh/ton na média mundial no mesmo período (INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE, 2017). Para efeito de comparação, o aço primário necessita em média 6,6 MWh/ton para ser produzido (BCS, 2005), mesmo possuindo um ponto

de fusão muito superior. Levando em conta que os gastos com energia representam até 40% dos custos de produção do alumínio primário (HYDRO, 2012), fica claro que há necessidade de desenvolver técnicas para aumentar a eficiência energética do processo. Cerca de metade de toda a energia consumida em uma planta de produção de alumínio primário é dissipada ou perdida para a atmosfera na forma de calor rejeitado, e a recuperação térmica apresenta um grande potencial para redução de custos e impacto ambiental.

O processo de transformação da alumina em alumínio metálico mais utilizado na indústria é baseado no processo Hall-Héroult, que consiste em dissolver a alumina em um banho eletrolítico de criolita fundida (hexafluoraluminato de sódio), em um cadinho de aço recoberto por grafite. Uma corrente elétrica é passada através do eletrólito à baixa voltagem porém alta corrente, de até 500.000 amperes nos fornos mais modernos. A corrente elétrica flui entre um anodo de carbono, feito de uma mistura de carvão coque e piche, e o catodo que é o próprio grafite que recobre o cadinho. O anodo é consumido durante o processo, liberando gás carbônico. Alumínio fundido é depositado no fundo do cadinho e sifonado periodicamente, levado à um forno de espera onde se estabelece a composição final da liga produzida e remoção de impurezas (HYDRO, 2012). Quando a temperatura de vazamento é atingida, o alumínio é vazado em lingotes de diferentes formatos, a depender da destinação do produto, podendo ser a refusão em outras indústrias ou processos de conformação como extrusão e trefilação. Com frequência, a planta de produção de alumínio primário incorpora um setor de produção de anodos, pois é um consumível de grande demanda. A Figura 8 mostra o fluxograma das principais etapas da produção de alumínio primário.

Figura 8 - Fluxograma das principais etapas de produção do alumínio primário.

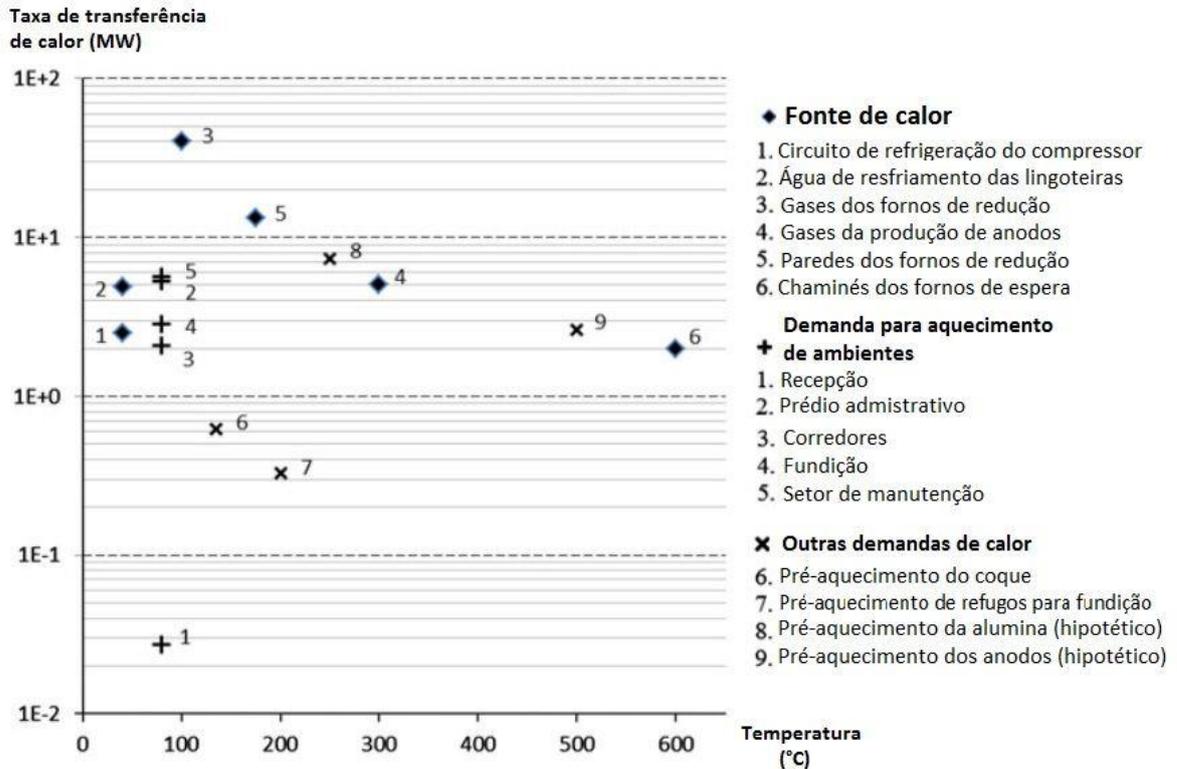


Fonte: Adaptado de Hydro, 2012.

Embora o calor rejeitado seja abundante neste tipo de indústria, oportunidades para o uso do calor recuperado permanecem limitadas. Entre os motivos destacam-se: a baixa temperatura dos gases oriundos do forno de redução, a distância entre os locais de dissipação de calor e os locais onde este calor pode ser reinserido e a natureza transitória dos processos de transferência de calor, que nem sempre garante sincronia entre a disponibilidade e demanda de energia na planta (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2008), (HIDEKI, HIDEKI e KONDO, 2008). Cada planta apresenta um *layout* diferente, o que dificulta a implementação de sistemas de recuperação térmica, e estratégias de implementação de tecnologias com retorno financeiro superiores a 3 anos são frequentemente rejeitadas (BCS, 2005). Apesar das dificuldades encontradas, esforços por parte da indústria são crescentes e investe-se em parcerias com pesquisadores e universidades, principalmente na Noruega, Canadá e EUA. Um estudo (NOWICKI e GOSSELIN, 2012), conduzido na planta Alcoa Deschambault Quebec, identificou as mais viáveis fontes de calor rejeitado e os principais pontos de reinserção. As fontes identificadas foram: os gases de exaustão dos fornos de redução, o calor rejeitado pelas paredes dos fornos de redução, calor proveniente da fabricação dos anodos, calor rejeitado pelo resfriamento do alumínio no forno de espera e o calor rejeitado pelo circuito de resfriamento das lingoteiras. Os principais pontos de reinserção do calor identificados foram: aquecimento dos locais de trabalho na planta devido ao clima frio, pré-aquecimento do carvão coque para manufatura dos anodos, pré-aquecimento de refugos de alumínio destinados à refusão, pré-aquecimento dos cadinhos e anodos, pré-aquecimento da carga de alumina. O gráfico da Figura 9 ilustra os resultados do

estudo realizado na planta Alcoa Deschambault Quebec, com as principais fontes e demandas de calor identificadas.

Figura 9 - Gráfico das principais fontes e demandas de calor identificadas na planta Alcoa Deschambault Quebec.



Fonte: Adaptado de Nowicki e Gosselin, 2012.

2.3.2 Alumínio Secundário

Na maior parte dos países, existem mercados bem estabelecidos e cadeias produtivas já firmadas envolvendo diversas empresas responsáveis pela coleta e seleção das sucatas, refino, fundição e comercialização de alumínio secundário (HYDRO, 2012). Os produtos feitos de alumínio tem como característica a capacidade de ter seu ciclo de vida reiniciado indefinidamente. A partir de sucata “nova” criada durante as diversas perdas de processo nas indústrias, ou ainda sucata “velha” que constitui os produtos descartados após seu consumo, o alumínio pode ser refundido, sua composição corrigida e padronizada, e dar origem a novos produtos sem prejuízo para o desempenho do material. Esta estratégia também é vantajosa do ponto de vista produtivo, pois o alumínio pode ser visto como “energia em forma sólida”: A reciclagem requer cerca de 5% do investimento energético em relação ao processo primário

(ALBERT, 2012), ou seja, o alumínio sólido pode ser considerado um “banco de energia” onde paga-se apenas 5% cada vez que se necessita de mais alumínio. Em 2007 foram produzidos mundialmente aproximadamente 18 milhões de toneladas de alumínio reciclado, ou 32% da produção total de alumínio no mesmo ano e o Japão por exemplo, já nos anos 80 cessou a produção de alumínio primário em favor do reciclado devido ao custo da energia após a crise do petróleo (INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE, 2009).

O processo de reciclagem do alumínio inclui as etapas de coleta, separação das sucatas pela sua composição e tratamentos para remoção de óleos, tintas e outros contaminantes. É então enviado ao forno de fundição, fundido e adicionado a pós fluxantes tais como cloreto de sódio e cloreto de potássio com o propósito de separar-se impurezas e prevenir a oxidação do metal líquido. Sua composição é ajustada conforme a especificação da liga desejada e em seguida é solidificado em lingotes destinados a processos de conformação mecânica, lingotes para indústria de fundição ou diretamente em peças semi-acabadas (HYDRO, 2012).

O tipo de forno de fundição mais utilizado pelas indústrias de processamento de alumínio secundário é o forno revérbero, embora muitas indústrias utilizem também fornos elétricos à indução, fornos de cúpula, fornos do tipo torre, entre outros. Para fornos revérberos, a demanda energética por tonelada de alumínio produzido varia entre 0,8 e 1,45 MWh/ton (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2008), com valores típicos em torno de 1,15 MWh/ton para fornos sem sistemas de recuperação térmica. Os gases deixam o forno aquecidos à uma temperatura entre 1000°C a 1200°C, levando consigo até 60% da energia investida através de calor perdido para a atmosfera.

A indústria do alumínio secundário, historicamente, é relutante em relação ao uso de tecnologias de recuperação de calor, com algumas plantas tentado anteriormente adotar técnicas de recuperação como pré-aquecimento de ar e desistido ao encontrar custos de manutenção elevados. Os desafios para implementação destas tecnologias incluem corrosão nas tubulações causadas por cloretos e fluoretos liberados na adição de elementos fluxantes, combustão secundária de voláteis no interior do recuperador e superaquecimento provocando danos nas tubulações. Apesar destes desafios, técnicas aprimoradas foram criadas para contorná-los, como uso de *by-pass* dos gases no momento da adição dos fluxantes, tratamentos mais completos da carga metálica para remoção de voláteis e

melhoria do controle de combustão, com possibilidade de adicionar-se ar de diluição para resfriar gases sobreaquecidos. Outras tecnologias em alternativa ao pré-aquecimento de ar incluem regeneradores rotativos e sistemas de pré-aquecimento da carga metálica (BCS, 2005).

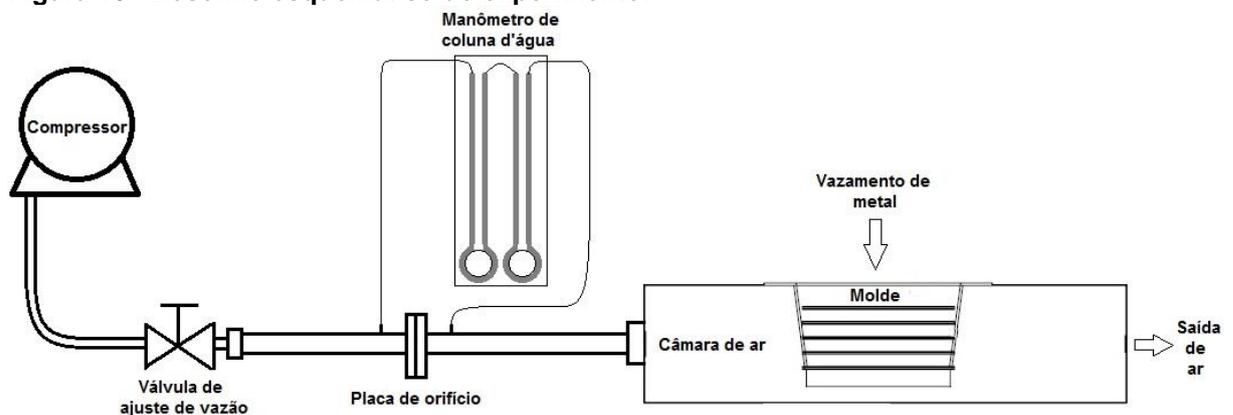
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Optou-se por construir um arranjo experimental de bancada em escala reduzida onde um escoamento interno de ar trocasse calor com as paredes externas de um molde, onde é vazado o metal. Dados obtidos durante o experimento, tais como temperatura em diversos pontos do sistema e vazão mássica de ar, foram utilizados para o cálculo do rendimento do calor extraído e do coeficiente global de transferência de calor.

Na construção do sistema experimental, procurou-se precisão na determinação do valor da vazão mássica de ar na entrada, evitando-se também vazamentos para garantia da conservação da massa no escoamento. O sistema de leitura de temperatura instalado no sistema foi escolhido visando alta frequência no registro dos dados e boa confiabilidade. Material isolante na superfície externa da câmara de ar foi usado a fim de minimizar as perdas de calor pelas paredes.

A montagem do sistema experimental é esquematizada na Figura 10, com seus elementos descritos nas seções seguintes.

Figura 10 - Desenho esquemático do experimento.



Fonte: Autoria própria.

3.1 MOLDE

O molde foi construído em chapa de aço 1010, com 3 mm de espessura, soldadas por processo MIG, possuindo um flange para fixação e aletas de 0,5 mm de espessura para melhorar a troca de calor. Seu formato foi concebido para que houvesse semelhança com lingoteiras comerciais, porém em escala reduzida. As

dimensões na parte superior são 100x200 mm, 90 mm de profundidade e 5 graus de ângulo de saída, resultando em uma área total de troca térmica de 0,068 m². A capacidade volumétrica do molde é de 1,25 litros, o que permite receber 3,5 kg de alumínio. O molde é mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Molde utilizado no experimento.



Fonte: Autoria própria

3.2 CÂMARA DE AR

O duto onde o molde é montado e ocorre a troca de calor, aqui referenciado como câmara de ar, foi construído com chapa de aço galvanizado de 0,5 mm de espessura, com as suas emendas unidas por processo de brasagem com estanho, para que houvesse vedação. Em suas extremidades foram fixados dutos de entrada e saída de ar. A entrada possui duas polegadas de diâmetro e rosca em sua ponta para acoplamento de um tubo de alimentação. A saída possui 10 mm de diâmetro.

Para garantir a conservação da massa durante o escoamento do ar, foi necessário preencher o espaço entre a câmara de ar e o flange do molde com um material que oferecesse resistência ao calor intenso. O material escolhido foi uma manta refratária de rocha, prensada entre o flange e a câmara de ar. Uma placa de reforço de 4 mm de espessura foi necessária para suportar a carga provocada pelo aperto de dez parafusos de 1/4 de polegada, que receberam torque uniforme. Um teste de estanqueidade foi realizado e revelou uma vedação satisfatória em todas as soldas e união entre molde e câmara de ar.

A mesma manta refratária foi utilizada para o isolamento térmico do equipamento, recobrando toda a superfície da câmara de ar. Durante a realização do experimento, a superfície externa do isolamento permaneceu próxima à temperatura ambiente, satisfazendo o critério de redução de perda de calor. A câmara de ar, já com o molde montado é ilustrada na Figura 12.

Figura 12 - Câmera de ar do experimento instalada



Fonte: A autoria própria

3.3 MEDIÇÃO DA VAZÃO DE AR

Para a medição de fluxo de ar na entrada, optou-se por um dispositivo de medição por restrição em escoamento interno do tipo placa de orifício, construída conforme as recomendações da norma ASME MFC 14M - 2003. Este tipo de medidor baseia-se no princípio da leitura de um diferencial de pressão entre a montante e a jusante de uma restrição provocada por uma placa com um pequeno orifício concêntrico à tubulação e perpendicular ao fluxo. As equações de continuidade e de Bernoulli, em conjunto com fatores de correção normatizados, permitem estimar a

vazão volumétrica do fluido e garantem uma boa precisão de leitura, na ordem de 1% de incerteza (ASME - AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2003).

Para este trabalho, o dispositivo foi construído com tubulação de duas polegadas de diâmetro e flanges para fixação de placas com orifícios de diversos tamanhos, para diferentes faixas de leitura de vazão. As tomadas de pressão foram conectadas a manômetros de coluna d'água, de 1 m de escala útil e graduação para fácil leitura. Parâmetros de cálculo, tais como temperatura ambiente e pressão atmosférica estimada em função da altitude no local, foram obtidos e levados em consideração, garantindo precisão nas leituras. A Figura 13 mostra a montagem do equipamento de medição de vazão.

Figura 13 - Aparato de medição de vazão de ar do tipo placa de orifício.



Fonte: Autoria própria

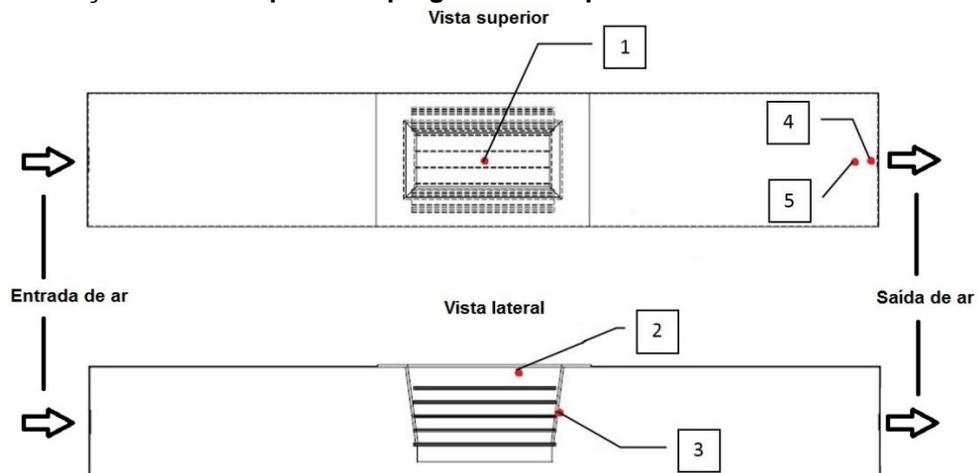
Para o fornecimento de ar foi utilizado um compressor do tipo parafuso. A vazão de ar foi regulada mediante uma válvula localizada na linha de alimentação. Cabe ressaltar que, em aplicações industriais, o uso de um compressor deste tipo torna-se inviável para o fornecimento de alta vazão de ar, sendo recomendável o uso de um soprador centrífugo com inversor de frequência para o controle da vazão.

3.4 LEITURAS DE TEMPERATURA

As leituras de temperatura foram feitas utilizando o equipamento de aquisição de dados National Instruments NIPXI 1050 e o software LabView do mesmo fabricante. Cinco termopares do tipo K foram conectados ao sistema, que foi configurado para registrar dez leituras simultâneas por segundo. Os dados de temperatura em função do tempo foram exportados para planilhas e o software Excel foi utilizado para o tratamento dos dados e geração dos gráficos.

A Figura 14 indica a localização dos termopares no equipamento, sendo: [1] submerso no alumínio vazado, [2] e [3] em contato com a superfície externa do molde, [4] e [5] na saída de ar. O uso de termopares realizando medidas em locais semelhantes se deve a necessidade de indicativo de discrepâncias entre leituras e existência de termopar sobressalente no caso de falha. As medidas de precaução e controle em conjunto com a grande quantidade de leituras feitas satisfaz o último critério de funcionamento do experimento.

Figura 14 - Posição dos termopares empregados no experimento.



Fonte: Autoria própria

3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Alumínio 98,6% puro foi selecionado no experimento, devido à disponibilidade das suas propriedades físicas na literatura e pelo conhecimento do seu comportamento durante a solidificação.

Na tabela 1 pode ser observada a composição química da liga, referente a uma amostra retirada imediatamente antes do vazamento e analisada em

espectrômetro de emissão ótica modelo Shimadzu PDA 7000, pertencente ao CETEM da UTFPR-PG.

Tabela 1 - Composição química da liga utilizada no experimento.

| | Cu | Si | Mg | Zn | Fe | Mn | Ni | Ti | Cr | Sn | Pb | V | P | Ca | Al |
|---|-------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-------|--------|
| % | 0,049 | 0,34 | 0,0001 | 0,084 | 0,833 | 0,012 | 0,013 | 0,013 | 0,004 | 0,003 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,002 | 98,641 |

Fonte: Autoria própria

O procedimento experimental foi iniciado com a montagem do equipamento, posicionamento de todos os termopares e teste do sistema de aquisição de dados. A vazão de ar foi regulada em 90 L/min aferidos com o uso do manômetro ligado ao sistema de placa de orifício. O molde foi pré-aquecido até a temperatura de saída do ar estabilizar-se a 150°C.

O vazamento do alumínio líquido foi realizado diretamente do cadinho para o molde, sendo a temperatura de vazamento considerada como a maior leitura obtida pelo termopar submerso no banho (695°C). Nenhum termopar apresentou falha durante o experimento, a vazão de ar manteve-se constante e a gravação de dados durou 1h e 15 min. As condições iniciais do experimento são resumidas na Tabela 2.

Tabela 2 - Condições iniciais do experimento.

| Temperatura do ar na entrada | Vazão de ar Volumétrica | Vazão de ar Mássica ($\rho = 1,05 \text{ kg/m}^3$) | Temperatura de vazamento | Temperatura de fusão | Área de troca térmica do molde | Massa do lingote vazado |
|------------------------------|-------------------------|---|--------------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------|
| 25 °C | 90 l/min | 0,001576 kg/s | 695 °C | 660 °C | 0,0068 m ² | 3,5 kg |

Fonte: autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

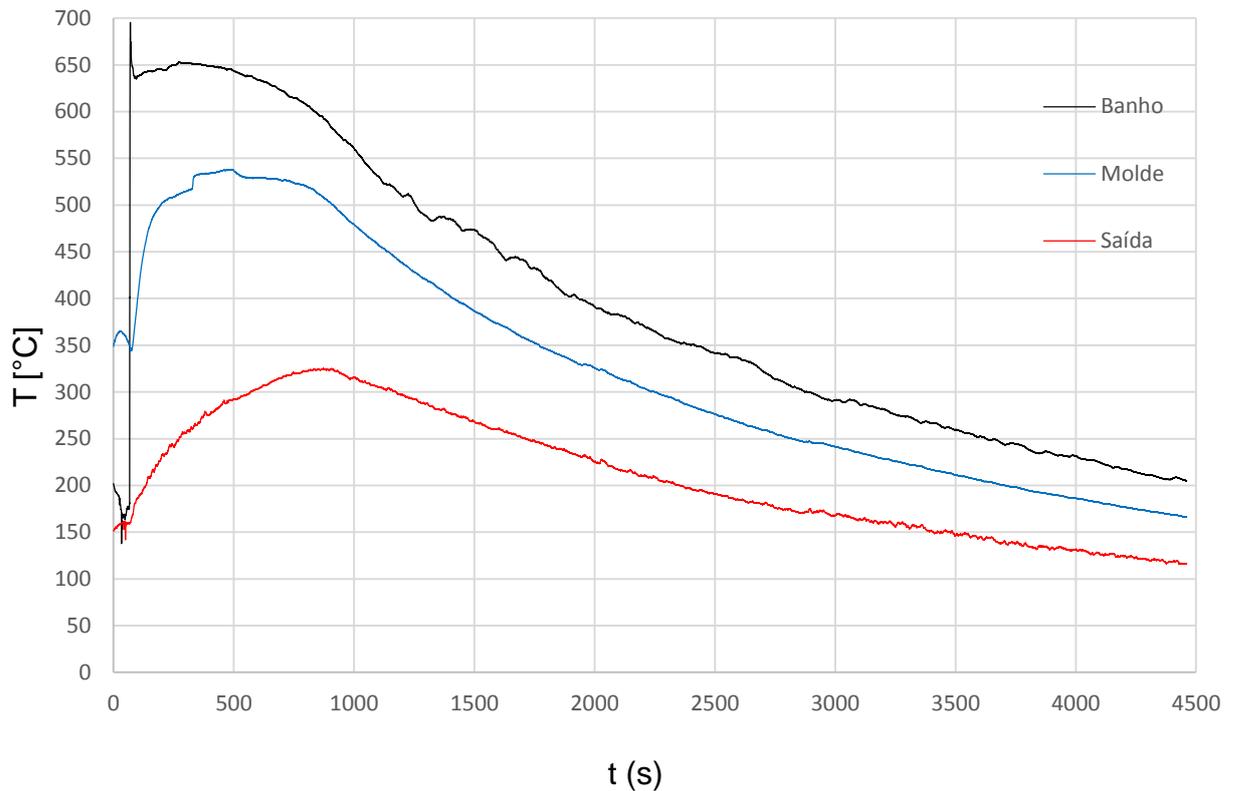
Esta seção exibe os resultados obtidos no experimento de recuperação de calor por fluxo de ar. São apresentados os perfis de temperatura obtidos pelo sistema de aquisição de dados, a variação do coeficiente global de transferência de calor do sistema durante o experimento, as potências térmicas de saída obtidas e o cálculo da eficiência de extração de calor. Em seguida, são abordadas duas possíveis aplicações do ar aquecido nas indústrias de alumínio secundário: pré-aquecimento de carga e pré-aquecimento do ar de combustão.

4.1 RENDIMENTO DA EXTRAÇÃO DE CALOR

4.1.1 Perfis de temperatura

O gráfico contendo as leituras de temperatura dos termopares (referenciados na Figura 14) do banho metálico [1], da superfície externa do molde [2] e da saída de ar [5] é mostrado na Figura 15. Os demais termopares obtiveram leituras semelhantes, confirmando a confiabilidade das leituras e sendo tratados como dados de controle.

Figura 15 - Temperaturas em função do tempo durante o experimento.



Fonte: Autoria própria.

Na curva de temperatura do banho metálico percebe-se uma rápida passagem do estado de líquido superaquecido a 695°C para uma temperatura de super-resfriamento de 635°C , como definido na Eq. (9), em um intervalo de 24 s. Em seguida, a temperatura volta a subir durante a solidificação devido à liberação de calor latente chegando a atingir 653°C (próximo à temperatura de fusão) no instante 273s, seguida por um lento resfriamento até a temperatura final do experimento, 205°C aos 4460s. O comportamento observado concorda com o descrito pela literatura (GARCIA, 2001) (MÜLLER, 2002).

A curva de temperatura da superfície externa do molde demonstra um pequeno atraso no aquecimento, devido à absorção de calor pelas suas paredes, mantendo temperaturas acima de 510°C entre os instantes 275s e 860s com um pico de 537°C . Posteriormente, acompanha a curva do banho com uma diferença de temperatura média de 80°C , causado pela estabilização da resistência térmica após a solidificação do lingote, concordando com o sugerido pela literatura (TAHA , EL-MAHALLAWY, *et al.*, 2001).

A curva de temperatura do ar na saída possui maior atraso para aquecimento, sendo a troca térmica com a câmara de ar responsável por tomar parte do calor do

fluxo de ar antes que este atinja a saída. No instante 872s a temperatura atinge seu pico em 325°C. Após o aquecimento das paredes da câmara de ar, a curva apresenta diferença média de 100°C em relação às superfícies de troca térmica do molde.

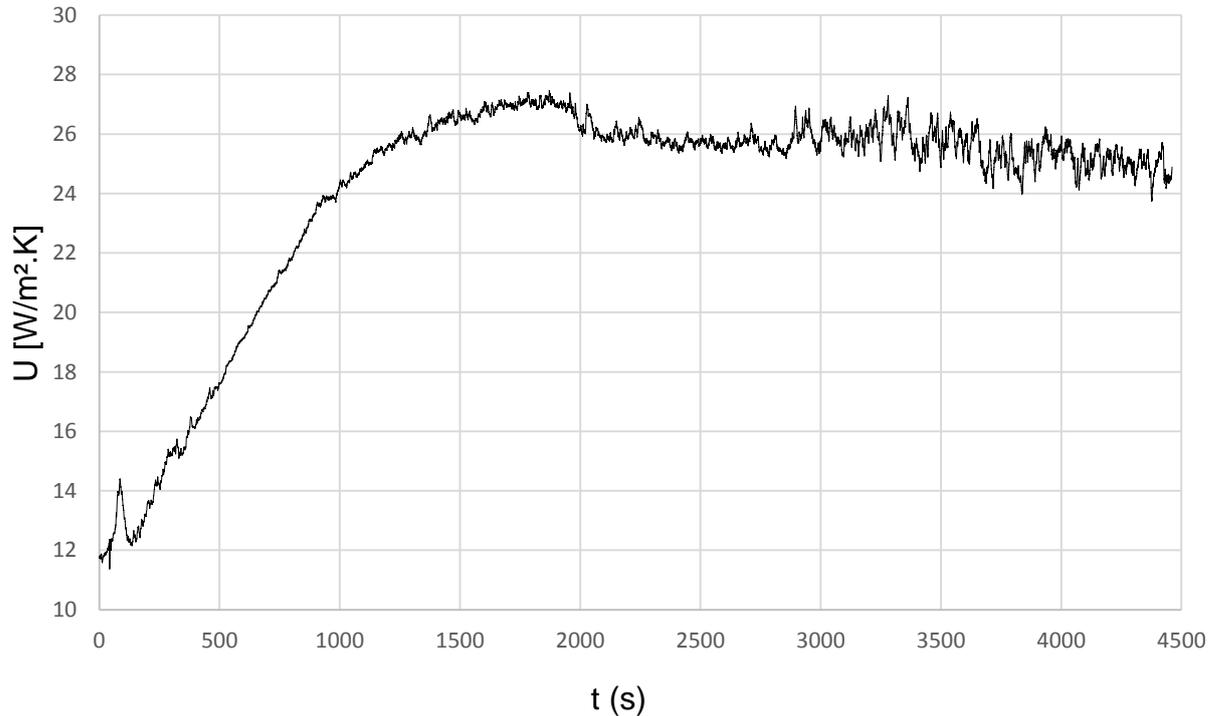
4.1.2 Coeficiente global de transferência de calor

Um importante parâmetro para a avaliação da qualidade da extração de calor em um molde refrigerado é o coeficiente global de transferência de calor U (GARCIA, 2001), já descrito na seção 1.3.3.4 e definido pela Eq. (25):

$$U = \frac{\dot{m}_f \cdot C_p (T_{sai} - T_{ent})}{A_t \cdot \Delta T_{ml}} \quad (25)$$

A vazão mássica de ar \dot{m}_f é obtida através da vazão volumétrica medida pelo sistema de placa de orifício, 90 L/min, multiplicada pela densidade do ar no local estimada em função da altitude 1,05 kg/m³, resultando em $\dot{m}_f = 0,001576$ kg/s como valor médio obtido durante o experimento. T_{sai} é a temperatura registrada na saída de ar a cada instante, T_{ent} é a temperatura na entrada de ar (temperatura ambiente, 25 °C durante todo o experimento), A_t é a área de superfície de troca térmica medida como 0,068m². ΔT_{ml} foi definido pela Eq. (23) como a diferença média logarítmica de temperatura. O calor específico do ar foi definido no valor de 1,028 kJ/kg.K, correspondente a uma temperatura de 220°C. A variação de U ao longo do experimento é mostrada na Figura 16.

Figura 16 - Variação do coeficiente global de transferência térmica em função do tempo.



Fonte: Autoria Própria

Pode-se perceber um atraso no aumento do coeficiente global de transferência de calor, também causado pela absorção de calor pelo sistema (câmara e molde) antes de atingirem o equilíbrio térmico, reduzindo a eficiência da transferência de calor para o fluxo de ar nos primeiros instantes. Posteriormente, o coeficiente U estabelece-se em um valor médio de 26 W/m².K, sendo este valor coerente para sistemas de convecção forçada gasosa em escoamento interno (INCROPERA, LAVINE, *et al.*, 2011).

4.1.3 Cálculo de eficiência

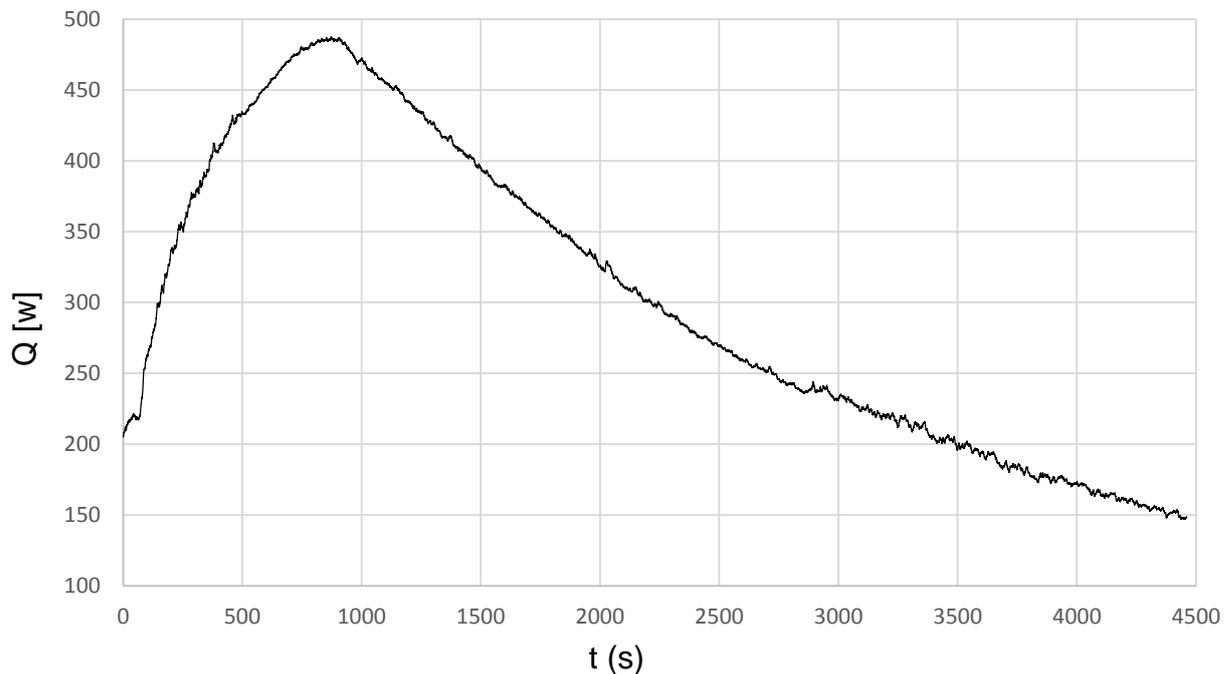
O cálculo da eficiência do sistema foi realizado a partir de um balanço de energia com uso da primeira lei da termodinâmica. Estabeleceu-se que a relação entre a energia obtida na saída e a energia liberada na solidificação e resfriamento do alumínio fornece um percentual de aproveitamento de calor.

A Eq. (27) mostra o cálculo de potência térmica instantânea na saída do equipamento:

$$\dot{Q}_{ar} = \dot{m}_f \cdot c_p \cdot (T_{sai} - T_{ent}) \quad [\text{W}] \quad (27)$$

Os valores de potência obtidos, em Watts, consideraram um valor de calor específico do ar igual a 1,03 kJ/kg.K na temperatura média da saída, sendo a variação deste parâmetro muito pequena (3,4%) na faixa de temperatura avaliada. A variação de potência pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 - Variação da potência de saída no tempo.



Fonte: Autoria Própria

Valores de máxima potência térmica, na ordem de 490 W, foram obtidos durante o experimento. Ao considerar a massa do lingote de 3,5 kg, consegue-se um valor correspondente de potência térmica específica igual a 140 W/kg. A integração numérica da curva da Figura 17, avaliada no tempo total do experimento, fornece um valor de energia total recuperada pelo ar (Q_{ar}) igual a 1,35 MJ, equivalente a 386 kJ/kg de alumínio.

O valor de energia fornecida pela solidificação e resfriamento do alumínio nas condições experimentais pode ser obtido pela Eq. (8) exposta na seção 2.1.1, combinada com a parcela do calor sensível do resfriamento do alumínio sólido, conforme apresentado na Eq. (28):

$$Q_{al} = mC_l(T_v - T_f) + mL + mC_s(T_f - T_{ref}) \quad (28)$$

onde T_v corresponde a 695 °C, T_{ref} a 205 °C e os demais parâmetros físicos obtidos na literatura técnica (ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO, 2007) para alumínio puro. O calor específico para o alumínio sólido foi considerado, para 300 °C, com o valor de 1,01 kJ/kg.K. Um valor máximo de energia de 2,86 MJ é obtido pela Eq. (28) ou ainda 817,3 kJ/kg.

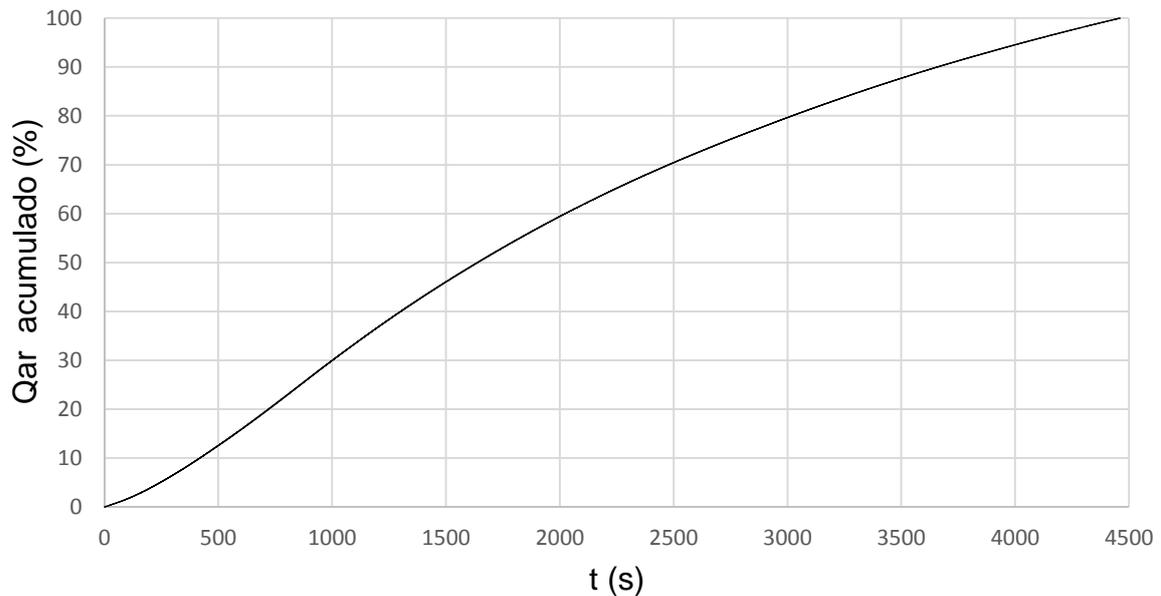
A eficiência da extração de calor pode ser avaliada dividindo-se a quantidade de energia obtida pelo fluxo de ar Q_{ar} pelo obtido através da solidificação e resfriamento do alumínio Q_{al} , conforme expresso pela Eq. (29):

$$\eta = \frac{Q_{ar}}{Q_{al}} \quad (29)$$

Os resultados do experimento permitiram a obtenção de uma eficiência de recuperação de calor de 47% para o intervalo de tempo de 4460 s. Apesar de ainda haver disponibilidade de energia ao fim do experimento pois ainda eram fornecidos 150W, a temperatura do ar chegara a 115°C, alcançando um valor baixo para aplicação industrial.

É possível também avaliar-se a quantidade de calor extraído pelo fluxo de ar Q_{ar} acumulado durante o tempo do experimento, como ilustrado na Figura 18. Pode-se observar, por exemplo, que 80% do calor é possível de ser extraído no instante de 3000s, para estas condições experimentais.

Figura 18 - Calor acumulado em relação ao total extraído em função do tempo.



Fonte: Autoria Própria.

4.2 POSSÍVEIS APLICAÇÕES DE RECUPERAÇÃO TÉRMICA

4.2.1 Pré-aquecimento da carga

Uma das possíveis aplicações do ar aquecido conforme discutido nas seções 1.3 e 2.3 deste trabalho, é o pré-aquecimento da carga. Em indústrias de alumínio primário esta carga consiste em alumina (óxido de alumínio), alumínio metálico oriundo de refugos da própria planta e materiais utilizados para compor a liga metálica desejada (NOWICKI e GOSSELIN, 2012). Em indústrias de alumínio secundário a carga consiste de sucatas do metal, podendo ser “novas”, vindas de refugos de processos industriais tais como cavacos de usinagem e retalhos de chapas ou ainda “velhas”, oriundas de produtos no fim de seu ciclo de vida como embalagens e pistões de motores, por exemplo. A depender de sua origem, podem-se apresentar em diferentes formatos, tamanhos e condições de contaminação, sendo comum indústrias de alumínio reciclado possuir um setor de tratamento de sucatas para adequá-las às condições de carregamento do forno. Os processos de tratamento podem incluir limpezas químicas para remoção de tintas e óleos, lavagens, separação magnética de materiais ferrosos, peneiramento, compactação, entre outros (INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE, 2009).

O pré-aquecimento da carga traz benefícios do ponto de vista energético, ao reduzir a demanda de calor necessária para fundir o metal e o tempo necessário para atingir a temperatura de fusão. Também contribui para o tratamento da carga ao retirar a umidade e outros compostos voláteis antes da alimentação do forno, aumentando a segurança da operação e durabilidade dos equipamentos ao evitar explosões e também aumenta o rendimento da carga ao reduzir a formação de escórias no banho metálico (ARINK e HASSAN, 2017).

A determinação da eficiência de um sistema de pré-aquecimento de carga não é tarefa simples, pois envolve múltiplas variáveis, entre as quais podem-se destacar: temperatura e vazão do fluxo de ar, tamanho e distribuição das sucatas, massa da carga, umidade e tempo de permanência na câmara de pré-aquecimento. A adoção de estratégias de controle que garantam temperaturas constantes é fundamental para o funcionamento do sistema, para que não haja resfriamento involuntário devido à redução de temperatura do fluxo de ar. Entre estas estratégias pode-se sugerir o controle automatizado de vazão de ar e inclusão de pequenos queimadores a gás para controle de temperatura. Uma alternativa que pode mostrar-se interessante seria conjugar o espaço de troca térmica do molde com a câmara de pré-aquecimento de carga, garantindo menores perdas de calor e economizando espaço físico.

Os resultados expressos nas seções 4.1.1 e 4.1.3 indicam a possibilidade de extrair-se um fluxo de ar a 325 °C contendo 140 W para cada kg de alumínio vazado na condição de pico. Assumindo que a carga seja exposta por tempo suficiente ao fluxo de ar e que a massa da carga é próxima a massa de metal vazado, é possível afirmar que há calor disponível para o pré-aquecimento de carga a temperaturas que garantam a remoção da umidade e aumento de eficiência do processo. É interessante notar que a quantidade de energia economizada no forno ao adotar-se carga pré-aquecida é maior do que a quantidade de energia transferida para a carga pelo sistema de pré-aquecimento, pois a energia total utilizada no forno deve ser computada levando em conta sua eficiência térmica. Como essa sempre é inferior a 100%, a energia economizada excede aquela investida no pré-aquecedor (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2006).

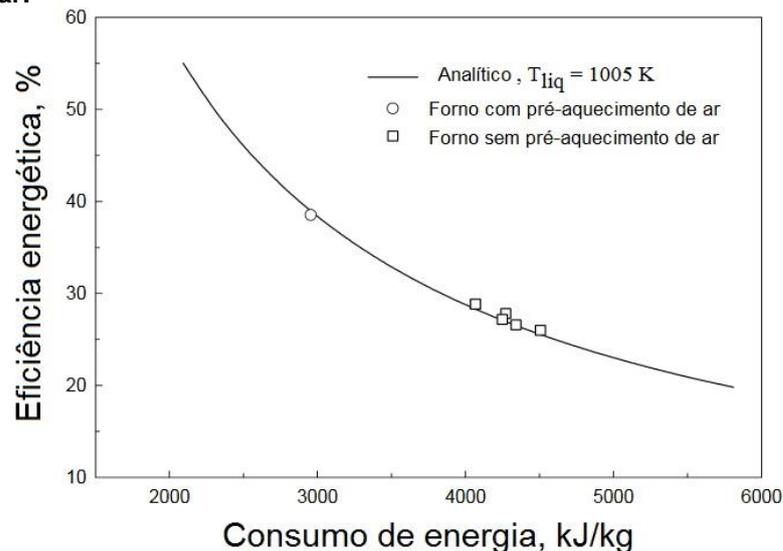
Assumindo um aumento de temperatura da sucata para o valor médio de 200 °C, o calor necessário para fundir um quilograma de metal pode ser calculado utilizando a Eq. (28). O alumínio puro necessita aproximadamente 956 kJ/kg para ser fundido a partir de 25 °C e 781 kJ/kg para ser fundido a partir de 200 °C, representando

uma diferença de 175 kJ/kg. Um forno operando a 30% de eficiência consumiria 3,187 MJ/kg de energia para fundir o metal alimentado a 25°C e 2,603 MJ/kg para fundir o metal a 200 °C iniciais, representando uma diferença de 584 kJ/kg. Isto representaria uma redução de demanda energética de 18,3%, que poderia ser explorada na forma de economia de combustível ou aumento de produtividade.

4.2.2 Pré-aquecimento do ar de combustão

Outra possível aplicação para o ar aquecido dentro das indústrias de alumínio é o aumento de eficiência térmica ao utilizá-lo como ar de combustão, uma técnica já utilizada em algumas plantas industriais. A abordagem tradicional consiste em utilizar trocadores de calor do tipo casco e tubo posicionados na chaminé do forno, onde o fluxo de gases quentes da combustão troca calor com o ar admitido através das paredes de tubos, prevenindo sua mistura. É encontrado um aumento de eficiência térmica entre 4-7% para cada 100 °C de aumento de temperatura do ar de combustão em fornos revérberos utilizados para fundir alumínio (DAS, 2007). A Figura 19 mostra o efeito do pré-aquecimento de ar a 215°C no consumo de energia quando comparado com cinco outros fornos sem pré-aquecimento de ar.

Figura 19 - Eficiência e consumo de energia em fornos com ar pré-aquecido a 215°C e sem pré-aquecimento de ar.



Fonte: Adaptado de DAS, 2007.

Apesar das vantagens já comprovadas, encontra ainda baixa adoção devido a fatores tais como elevados custos de implementação e manutenção, desgaste

excessivo dos trocadores de calor devido a exposição a compostos corrosivos e estresse térmico (BCS, 2005). O pré-aquecimento de carga seja por uso de fornos do tipo torre ou de equipamentos alimentados pelos gases de combustão também impedem a adoção de pré-aquecimento de ar por já utilizarem o calor disponível.

Os resultados já expressos nas seções 4.1.1 e 4.1.3 indicam a possibilidade de se utilizar ar aquecido a temperaturas que favorecem sua aplicação como ar de combustão, porém é necessário avaliar a vazão de ar requerida pelos queimadores de um forno e a quantidade de alumínio vazado. A maior parte dos fornos possuem capacidades que variam de 3000-15000 kg por batelada e utilizam uma vazão de ar de combustão na faixa de 50-250 m³/min a depender de sua eficiência (DAS, 2007). Mantidas as proporções do experimento deste trabalho, um forno que exigisse 100 m³/min de ar precisaria de aproximadamente 3900 kg de alumínio trocando calor. Outro fator que demanda atenção é a variação das condições da alimentação de ar no forno, pois devido à natureza transitória da solidificação do metal as temperaturas e densidades do ar apresentarão mudanças sensíveis. É necessário por tanto, haver controle preciso de queima de combustível.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O resultado do experimento sugere um importante potencial de aproveitamento de calor dentro das indústrias de alumínio utilizando como fonte o metal em solidificação e resfriamento, com uma eficiência de recuperação térmica na ordem de 47%. Pode-se observar nas seções 4.1.2 e 4.1.3 que o instante onde há maior potência fornecida na saída do sistema não coincide com o instante de maior coeficiente global de transferência de calor, devido à condição no início do experimento não possuir equilíbrio térmico entre a câmara de ar e o fluxo de ar. Esta condição foi imposta com o propósito de se avaliar uma situação de *Start-up*. Em aplicação prática onde o sistema operará de forma contínua, uma maior eficiência poderá ser obtida.

Foram investigados os possíveis usos de ar aquecido em indústrias de alumínio, sendo o pré-aquecimento de carga e pré-aquecimento de ar de combustão alternativas já em uso em algumas plantas utilizando como fonte de calor os gases aquecidos de combustão, porém ainda apresentam lento retorno de investimento e dificuldades operacionais, o que impede seu uso mais difundido. A alternativa proposta poderá mostrar-se vantajosa em situações onde o calor rejeitado nos gases de combustão já está em uso, como fornos do tipo torre, ou onde não haja combustão como é o caso de fornos elétricos a indução. Não há impedimentos, porém, de adotar-se esta técnica em conjunto com outros sistemas de recuperação térmica, para uma melhora significativa de eficiência energética.

Futuros trabalhos serão necessários para se avaliar o desempenho de um sistema em escala real e o desenvolvimento de equipamentos compatíveis com o uso industrial. Pode-se sugerir o estudo de fatores que poderão contribuir para melhor aproveitamento de calor em futuros trabalhos:

- Emprego de materiais de maior condutividade térmica no molde e aletas;
- Estudo de otimização de aletas;
- Efeito da mudança da vazão de ar na eficiência da transmissão de calor;
- Revestimento absorvivo na superfície interna da câmara de ar para melhor aproveitamento de calor irradiado;
- Quantificação do calor perdido pela superfície exposta do alumínio e a possibilidade de coletá-lo.

- Formas de redução da resistência de contato na fronteira metal/molde, por exemplo através de aplicação de pinturas, acabamento superficial e mudança de formato do molde;
- Efeito do arranjo de vários moldes em série ou paralelo relativo ao fluxo de ar;
- Estudo do tempo de permanência do lingote vazado no molde para melhor aproveitamento do calor no menor intervalo possível.

Para tanto, o uso de modelos computacionais deverá mostrar-se valioso na obtenção de parâmetros de projeto antes de iniciarem-se novos experimentos. Outros trabalhos poderão investigar estratégias de controle de temperatura necessárias para o funcionamento deste sistema de recuperação térmica, através por exemplo da criação de rotinas em controladores lógicos programáveis que atuem na leitura de temperatura e realizem a correção da vazão de ar, de forma a obter temperaturas estáveis. O uso de regeneradores também poderá ser avaliado, de forma a garantir acúmulo de energia térmica a ser liberada de forma mais contínua.

6 REFERÊNCIAS

- ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Guia Técnico do Alumínio: Características Físicas e Químicas**. São Paulo: Editora da ABAL, v. 11, 2007.
- ALBERT, D. **Design of heat recovery system in an aluminium cast house**. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, Noruega, p. 87. 2012.
- ARINK, T.; HASSAN, M. Metal scrap preheating using flue gas waste heat. **Energy Procedia**, v. 105, p. 8, 2017.
- ASME - AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Measurement of Fluid Flow Using Small Bore Precision Orifice Meters**. EUA: ASME, 2003. 24 p.
- BCS. U.S. Department of Energy. **Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry**, Columbia, EUA, 2005.
Disponível em:
<<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/advancedmeltingtechnologies.pdf>>. Acesso em: 17 de agosto 2017.
- CAMPOS FILHO, M. P.; DAVIES, G. J. **Solidificação e Fundição de Metais e Suas Ligas**. São Paulo: Editora da USP, 2008.
- DAS, S. K. **Improving Energy Efficiency in Aluminum Melting**. University of Kentucky. Lexington, p. 67. 2007.
- GARCIA, A. **Solidificação Fundamentos e Aplicações**. Campinas: Editora da Unicamp, 2001.
- HIDEKI , H.; HIDEKI, K.; KONDO,. A rationalization guideline for the utilization of energy and resources considering total manufacturing processes: An exergy analysis of aluminum casting processes. **Synthesiology**, v. 1, n. 3, p. 212-221, 2008.
- HYDRO. **Aluminium environment and society**, Oslo, 2012. Disponível em:
<http://www.hydro.com/globalassets/1-english/about-aluminium/files/aluminium_environment-and-society.pdf>. Acesso em: 2017 de agosto 17.
- INCROPERA, F. A. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. World-Aluminium. **Global Aluminium Recycling: A Cornerstone of Sustainable Development**, Londres, 2009. Disponível em: <http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2013/01/15/fi0000181.pdf>. Acesso em: 17 de Agosto 2017.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Estatísticas atuais do IAI**, 2017. Disponível em: <<http://www.world-aluminium.org/statistics/>>. Acesso em: 17 de agosto 2017.

MÜLLER, A. **Solidificação e análise térmica dos metais**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2002.

NOWICKI, C.; GOSSELIN, L. An Overview of Opportunities for Waste Heat Recovery and Thermal Integration in the Primary Aluminum Industry. **The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society**, v. 64, 2012.

ROCHA, O. L. et al. Coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde e variáveis térmicas na solidificação direcional horizontal da liga Al-6%Cu. **HOLOS**, v. 29:5, 2013.

TAHA , M. A. et al. Estimation of air gap and heat transfer coefficient at different faces of Al and Al-Si castings solidifying in permanent mould. **Materials Science and Technology**, v. 17:9, p. 1093-1101, 2001.

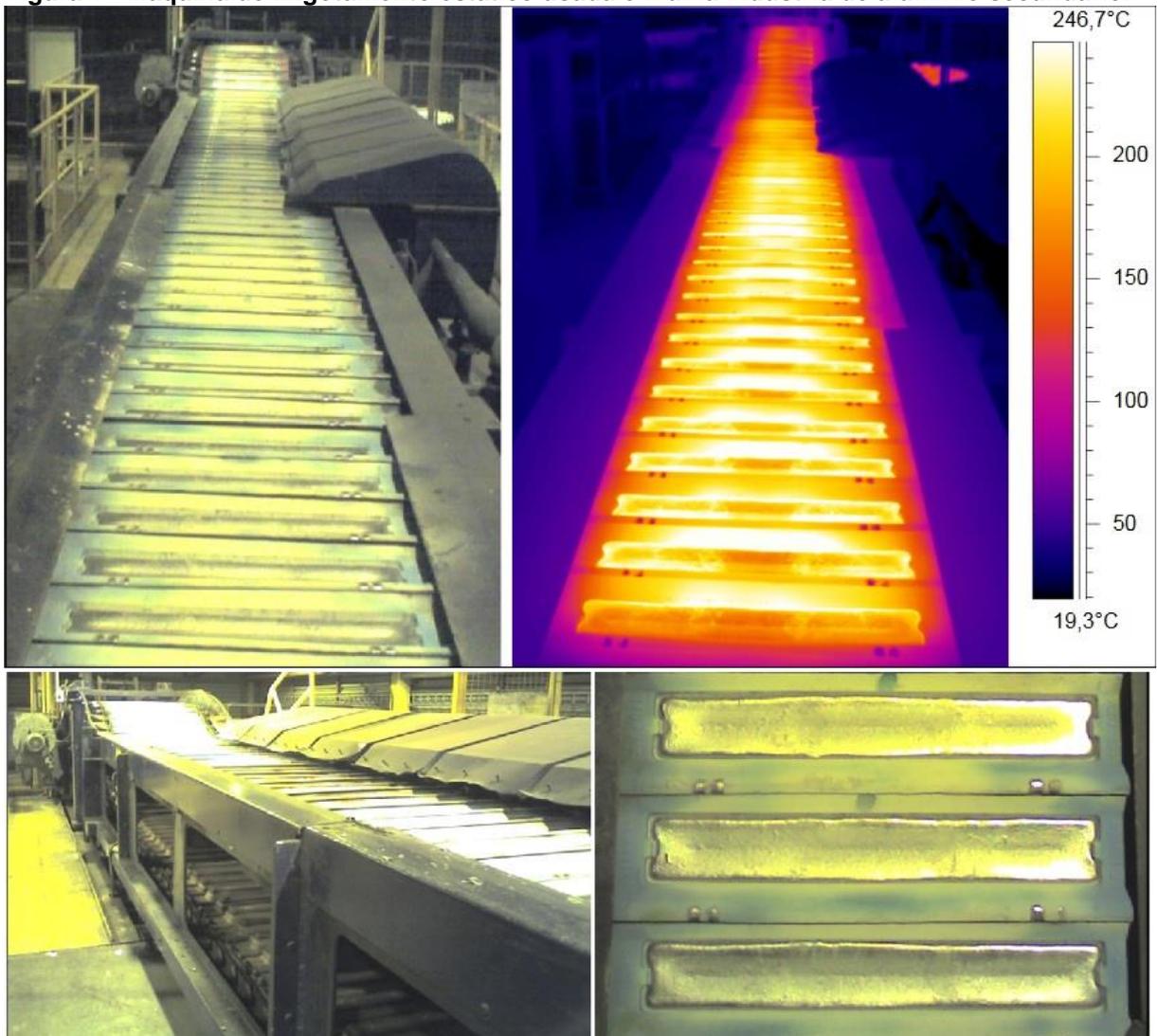
U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Process Heating Tip Sheet #9. **Load Preheating Using Flue Gases from a Fuel-Fired Heat System**, 2006. Disponível em: <https://energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/load_preheating.pdf>. Acesso em: 05 out. 2017.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry**, 2008. Disponível em: <https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/waste_heat_recovery.pdf>. Acesso em: 17 Agosto 2017.

ANEXO 1- MÁQUINA DE LINGOTAMENTO ESTÁTICO

Na figura 1, um exemplo de máquina de lingotamento estático utilizada em uma planta de alumínio secundário, os moldes são montados como em uma corrente e permanecem em movimento, onde recebem o vazamento de metal líquido em um ponto, prosseguindo para uma seção refrigerada a água e exaustores de ar. Após sua solidificação e resfriamento, os lingotes são desmoldados ao ficarem de cabeça para baixo e prosseguem para o setor de embalagem.

Figura 1 - Máquina de lingotamento estático usada em uma indústria de alumínio secundário.



Fonte: Albert, 2012.