

## ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE UM PEQUENO FORNO DE FUNDIÇÃO

Claudia Regina Matte; Paulo David Ganassini<sup>1</sup>  
Maria Regina Thomaz<sup>2</sup>  
Igor Schmidt<sup>3</sup>

### RESUMO

O processo de fundição é um dos processos mais utilizados na indústria de bens de consumo e bens duráveis, com a finalidade da obtenção de peças com baixo custo operacional. O objetivo deste trabalho é a otimização de um forno de fundição de pequeno porte, visando a redução dos tempos de fusão metálica e diminuição do consumo de gás combustível. Foram definidas diferentes configurações entre o uso de concreto refratário, isolante de manta cerâmica e fornecimento de ar para a combustão através de soprador de ar. Dentre os materiais utilizados constam um forno de fundição, amostras de alumínio, cadinho de aço carbono, isolante térmico manta cerâmica e gás GLP. O estudo demonstrou a redução significativa dos tempos de fusão do alumínio nas configurações onde se utilizou a manta cerâmica e o soprador de ar trabalhando em conjunto. Com a redução dos tempos de fusão ocorreu também a diminuição do consumo de gás combustível.

**Palavras-chave:** Fundição. GLP. Forno.

### 1 INTRODUÇÃO

As indústrias de processamento de matérias primas metálicas, assim como as demais indústrias, visam o aumento de produtividade, a redução de custos operacionais e desperdícios. Para que estes objetivos sejam alcançados, é comum a prática de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias que agreguem valor aos produtos e reduzam o tempo de fabricação.

Dentre os mais variados processos de fabricação industrial, encontra-se o processo de fundição, o qual consiste no vazamento de metal líquido num molde contendo uma cavidade com a geometria desejada para a peça final. O processo de fundição demanda materiais específicos para a sua execução, os quais devem ter características de resistência térmica e estrutural, (MOREIRA, 2011).

A indústria da fundição utiliza de grandes quantidades de energia para o processamento de seus produtos, sendo a energia térmica mais comumente utilizada. O aproveitamento energético é um fator chave para um bom desempenho de um processo de fundição. Para isso

---

<sup>1</sup> Acadêmicos do curso de Engenharia de Produção, UCEFF. E-mail: claudiamatte89@yahoo.com.br; paulo.pd@gmail.com.

<sup>2</sup> Docente do curso de Engenharia de Produção, UCEFF. E-mail: mare\_mrt@yahoo.com.br.

<sup>3</sup> Docente da UCEFF. E-mail: igor@frinox.com.br.

são usados materiais com características refratárias ao calor e resistentes a ataques químicos, além de serem capazes de manter sua integridade estrutural.

Análises de rendimento energético e o comportamento de materiais isolantes e/ou refratários são usualmente efetuados em fornos de pequeno porte ou fornos piloto, onde se relacionam e se caracterizam os problemas de quantificação de tempo para a fusão de determinados metais e também o dispêndio energético para tal. O intuito de se utilizar um forno piloto é o baixo custo e a praticidade no manejo durante a operação de fundição, (GROOVER, 1996).

Diante do exposto questiona-se: **Como otimizar de um pequeno forno de fundição?** O presente artigo tem por objetivo otimizar o uso de gás combustível GLP pelo aumento do fornecimento de oxigênio para a sua combustão, além de fornecer energia suficiente para a fusão de alumínio em menores tempos e em diferentes arranjos de equipamentos e materiais refratários, como o concreto refratário e a manta cerâmica. Desta forma será possível verificar a importância de cada técnica empregada para a fusão do metal utilizando um forno cadinho de pequeno porte.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Para Weiss (2017), o processo de fabricação industrial é o modo como determinado trabalho de construção e/ou transformação é realizado, geralmente, utilizando uma máquina de fabricação. A indústria de fabricação tem como objetivo principal a transformação da matéria-prima em um produto acabado e pronto para ser comercializado, gerando, assim, um valor agregado.

Contudo, para essa transformação, é necessário dispor de quantidades elevadas de energia e, também, de um processo de fabricação específico, com estrutura e equipamentos adequados. O produto fabricado pode ser um simples palito de fósforos, um lenço de papel ou algo mais complexo, como um automóvel, uma máquina operatriz ou um avião de passageiros. (WEISS 2017).

De acordo com Krajewski, Ritzman e Malhotra (2009) “Uma organização é tão eficaz quanto seus processos”, cada atividade do processo deve agregar valor à sua precedente, buscando a eliminação dos desperdícios e dos custos desnecessários.

Para uma empresa ser competitiva e manter-se no mercado de forma atuante, precisa identificar os principais problemas para posteriormente propor melhorias, as quais reduzirão seus custos e desperdícios, proporcionando progressos na produtividade, com melhoria da qualidade tornando a indústria mais enxuta (MOREIRA, 2011).

De acordo com Groover (1996) o processo de fabricação é um procedimento que objetiva realizar transformações físicas e/ou químicas no material inicial com objetivo de agregar valor a este material.

## 2.2 PROCESOS DE FABRICAÇÃO DE PRODUTOS METÁLICOS

Para Kiminami (2013), a fabricação de produtos metálicos utiliza processos que visam dar forma (geometria, dimensões, acabamento superficial) ao metal puro ou liga metálica com as especificações estabelecidas para o produto, e também conferir a este o conjunto de propriedades (resistência mecânica, dureza, resistência ao desgaste, resistência à corrosão, condutividade elétrica, densidade etc.) além de e propriedades ou atributos econômicos (preço e disponibilidade do material e de processos), exigido para o seu bom desempenho. Assim sendo, existe uma relação complexa e importante a ser considerada para a seleção do material e da rota de processamento, que é a relação entre as especificações do produto (forma, propriedades), metal ou composição da liga e os processos de fabricação.

Os processos de fabricação metálicos são classificados como processos com remoção de cavaco e sem remoção de cavaco. Nos processos com remoção de cavaco ocorre muitas formas de usinagem, sendo estas, usinagens do tipo convencional e do tipo não-convencional. As formas de usinagem do tipo convencional abrangem operações como: torneamento, fresamento, furação entre outros. Já nos processos não-convencionais pode-se citar operações como: jato d'água, jato abrasivo, fotoquímica entre outros. (GROOVER, 1996).

Processos de fabricação sem a remoção de cavaco são classificados como processos de fundição, soldagem, metalurgia do pó e conformação, sendo esta última subdividida em laminação, trefilação, extrusão, forjamento e estampagem.

## 2.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO POR FUNDIÇÃO

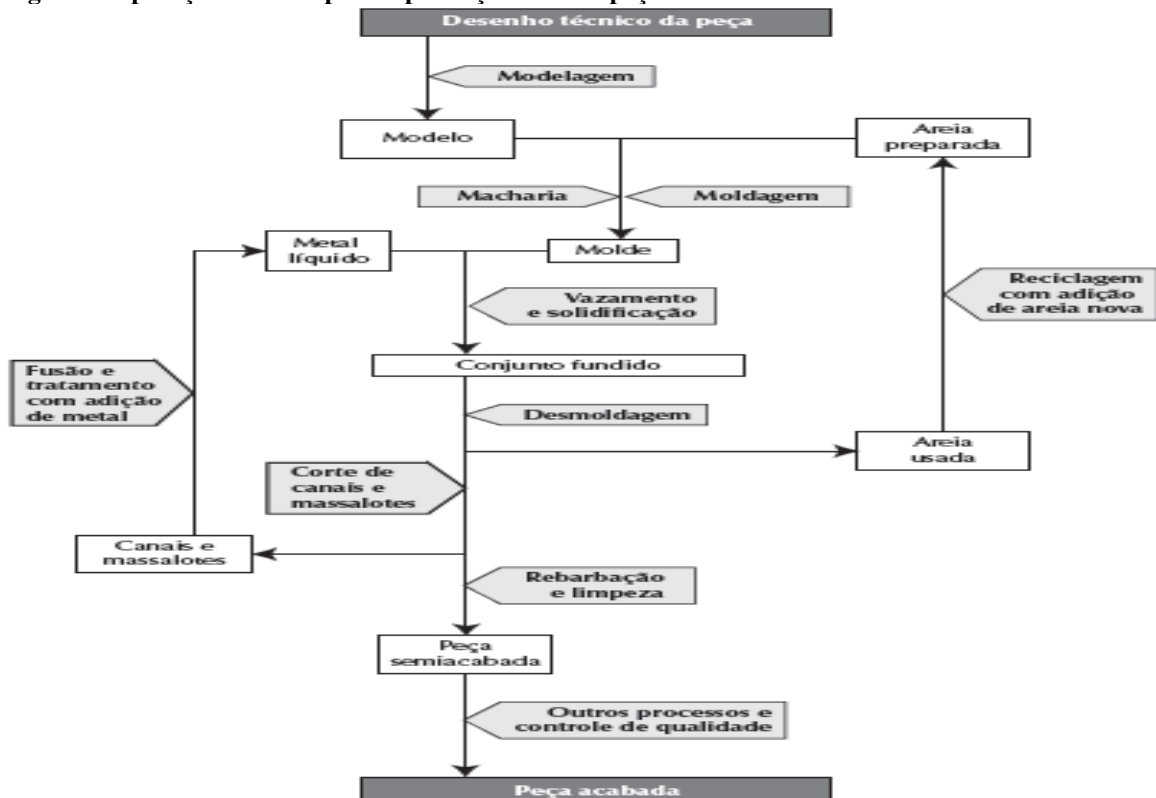
Groove (2016) define fundição “como um processo no qual o metal fundido flui pela força da gravidade, ou por ação de outra força, num molde em que ele solidifica com a forma da cavidade do molde”.

A fundição de peças é geralmente feita em uma fábrica chamada de fundição, onde são produzidos os moldes, o metal é fundido e trabalhado no estado líquido. Como vantagens do processo de fundição pode-se citar as dimensões das peças que podem ser desde poucas gramas, até produtos muito grandes e pesando toneladas, bem como a fabricação de peças complexas, já como desvantagem pode-se citar as limitações em propriedades mecânica, baixa precisão dimensional e acabamento superficial (GROOVER, 1996).

Segundo Chiaverini (1977), uma peça produzida por fundição, pode ter a forma definitiva ou não, pode ser de forma complexa, inclusive com detalhes internos. Os formatos das peças produzidas a partir do metal líquido pode ser submetida a trabalhos de conformação mecânica, no estado sólido com o que são obtidas novas formas das peças.

O fluxograma da Figura 1, demonstra as etapas do processo de fundição de uma peça fundida:

**Figura1: Operações básicas para a produção de uma peça fundida**



Fonte: Adaptado de Kiminami (2013).

A Figura 1 demonstra um fluxograma simplificado das operações básicas para a produção de uma peça fundida, a qual pode ser aplicada a maioria dos processos de fundição.

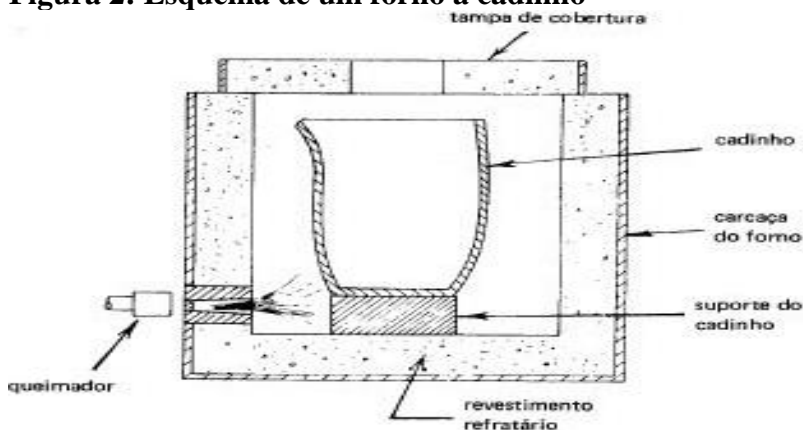
## 2.4 TIPOS DE FORNOS DE FUNDIÇÃO

### 2.4.1 Fornos De Cadinho

Utilizados em pequenos empreendimentos como fábricas de painéis de alumínio, laboratórios destinados a fundir ligas não ferrosas de baixo ponto de fusão e em fundições de peças de reposição para indústria pesqueira artesanal, estes fornos são empregados na fundição de ligas não ferrosas tais como chumbo, alumínio, bronze, etc. Caracterizam-se por uma forma cilíndrica, revestidos, na parte externa, por chapas metálicas. Para o problema de fusão em pequena escala, é uma solução simples e barata. Num empreendimento de pequena escala, será sempre a primeira opção (OLIVEIRA, 2013). O forno cadinho de fusão é o método mais barato para fusão de pequenos volumes de metais. Além disso, não nenhum choque direto da chama sobre o metal, e a perda de calor para o lado de fora é limitado pela espessura das paredes, (BCS, 2005).

A razão para a preferência por forno de cadinho segundo Oliveira (2013) é a versatilidade em termos de produtividade, que varia apenas com a mudança do tamanho do cadinho. Pode-se fundir de pequenas e médias quantidades, alterando a escala de produção, simplesmente mudando o cadinho. Outra vantagem é a versatilidade no uso de combustíveis, ele é capaz de queimar diferentes combustíveis como óleo queimado, gás liquefeito, óleo diesel e até óleo de cozinha. Conforme a Figura2.

**Figura 2: Esquema de um forno a cadinho**



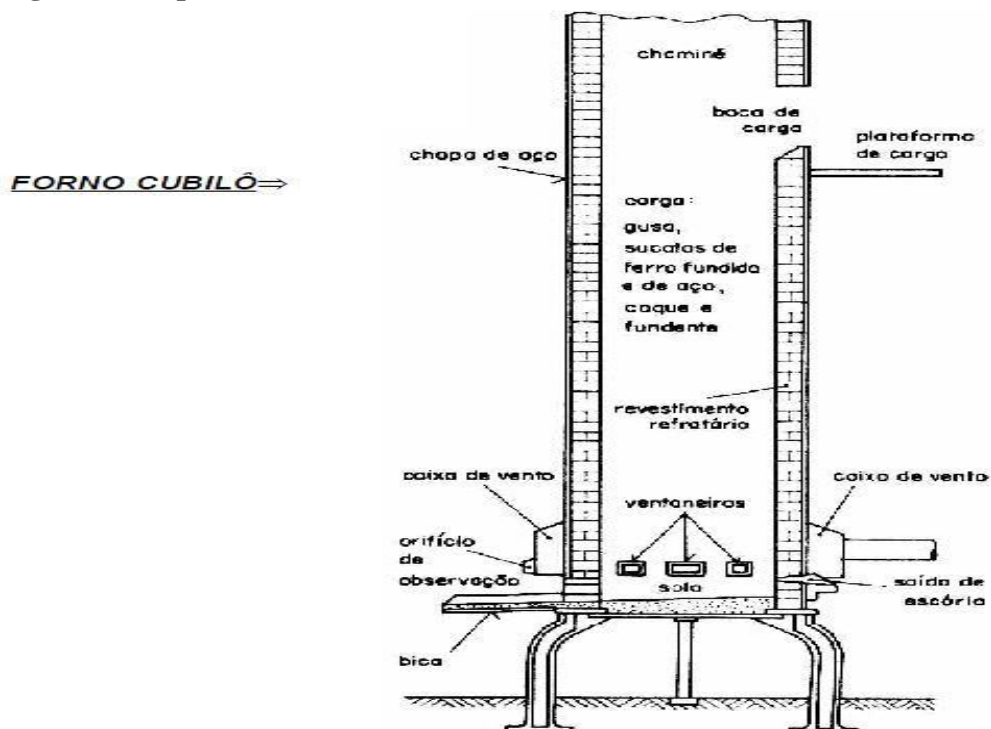
Fonte: Adaptado de Doyle et al (1978).

## 2.4.2 Forno Cubilot

O forno cubilot é o equipamento mais utilizado em fundições pela sua produtividade, versatilidade e pelo baixo custo de implantação. Em ordem de complexidade, ele é o segundo equipamento de fusão mais popular. Possui um sistema simples e econômico para fundir gusa e sucata de ferro. Ele é essencialmente um forno vertical, cercado por aço e revestido por refratário. Pode ser fabricado de 1,2 m a 2,8 m de diâmetro externo e pode variar de 1 a 3 m de altura, podendo produzir de 5 a 25t/h. (OLIVEIRA, 2013).

Segundo Oliveira (2013), um cubilot deve ser preparado e aquecido cuidadosamente para evitar danos. O revestimento é reparado ou substituído quando necessário, e as portas do fundo são fechadas. Uma camada de areia em declive para o furo de vazamento é socada sobre o fundo. Combustível – a proporção em peso entre metal e combustível varia de 8:1 até 12:1. No limite inferior economiza-se em combustível, mas perde-se em produção pelo maior tempo para fundir a carga. Fundentes – utiliza-se para auxiliar na formação de escória a fim de remover as impurezas e retardar a oxidação do metal. O fundente mais comum é o calcário, mas pode-se usar o carbonato de sódio e/ou fluorita, dependendo da disponibilidade.

**Figura 3: Esquema de um forno cubilot**



Fonte: Adaptado de Dumont Treinamentos (2018).

### 2.4.3 Forno de indução

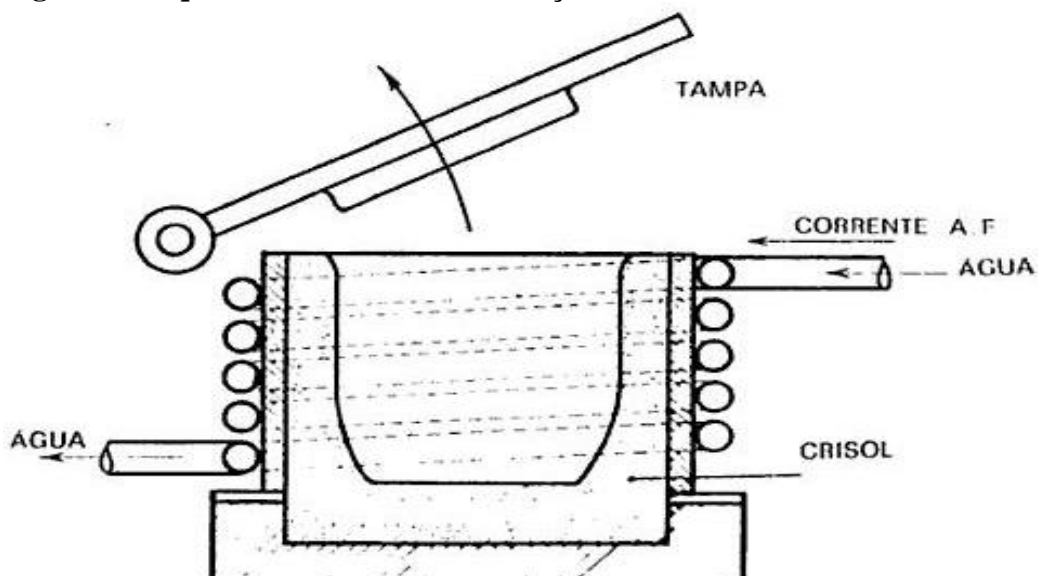
O funcionamento dos fornos de indução baseia-se na indução eletromagnética. Um condutor elétrico submetido a um fluxo magnético variável, produz uma força eletromagnética capaz de fundir os metais em curto período de tempo utilizando uma frequência elevada. O forno a indução é muito usado para fusão de materiais condutores. (DOTSCH, 2009).

Em tais materiais formam-se correntes de Foucault (correntes induzidas em massas metálicas), que produzem grande elevação de temperatura. Se os materiais forem magnéticos, haverá também o fenômeno da histerese que contribui para o aumento de temperatura. O forno consiste basicamente num transformador com o próprio forno sendo o secundário do transformador, constituído apenas por uma espira, (OLIVEIRA, 2013).

Para Dotsch (2009), o funcionamento dos fornos de indução baseia-se na indução eletromagnética. Faraday estudou este fenômeno e concluiu que um condutor elétrico submetido a um fluxo magnético variável, surge uma força eletromotriz (F.E.M) tanto maior quanto maior for à variação do fluxo.

Sendo muito usado para fusão de materiais condutores, formam-se nestes materiais correntes de Foucault (correntes induzidas em massas metálicas) que produzem grande elevação de temperatura. Se os materiais forem magnéticos, haverá também o fenômeno da histerese, que contribui para o aumento de temperatura, (DOTSCH 2009).

**Figura 4: Esquema de um forno de indução**



Fonte: Adaptado de Dumont Treinamentos (2018).



## 2.4.4 Forno elétrico a arco

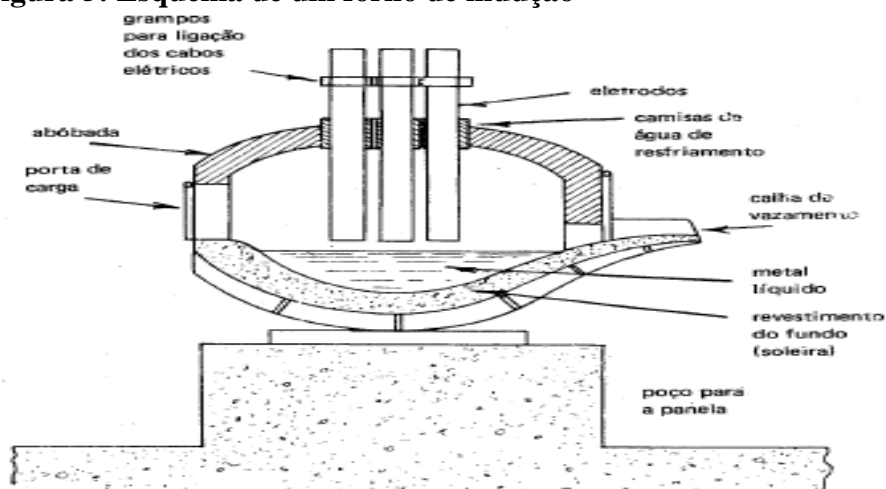
Para Birat (2000), numerosos tipos de fornos empregando a eletricidade como fonte de energia para a fusão e refino do metal têm sido desenvolvidos. Entretanto, em termos de utilização, o forno a arco e o forno de indução são os mais comuns.

Como o emprego de escória no forno de indução é difícil (em função da dificuldade para seu aquecimento), estes fornos encontram maior emprego em fundições e praticamente 100% da tonelagem produzida em aciarias elétricas provém de fornos a arco. O forno elétrico a arco é, sem dúvida, o instrumento mais versátil de produção de aço, e vem se tornando também, nas últimas décadas, um dos mais eficientes, (NEUSCHUTZ 2000).

Ainda para Neuschutz (2000), algumas das importantes vantagens do forno elétrico a arco são: (1) Tem alta eficiência energética. (2) Permite produzir praticamente qualquer tipo de aço, em função do controle do aquecimento virtualmente independente de reações químicas. (3) É um aparelho extremamente versátil, no que tange a carga, podendo ser operado com 100% de carga sólida. (4) Permite operação intermitente e mudanças rápidas na produção, em escalas desde dezenas até centenas de toneladas.

Fornos elétricos a arco são indicados para fusão de grandes quantidades de aço. Um forno elétrico a arco possui uma das maiores concentrações de potência 30 a 50 kW.cm<sup>3</sup>. O arco nada mais é que uma coluna de potência radiante, com flexibilidade física, cujos diâmetros e comprimentos são fixados pelos parâmetros elétricos da alimentação ditados pelo mecanismo regulador dos eletrodos e pela natureza dos materiais envolvidos, (OLIVIERA, 2013).

**Figura 5: Esquema de um forno de indução**



Fonte: Adaptado de Oliveira (2013).



## 2.5 A IMPORTÂNCIA DOS MATERIAS REFRAATÁRIOS NA FUNDIÇÃO

Muitas etapas do processamento de materiais são feitas a temperaturas elevadas, como por exemplo a fundição e os tratamentos térmicos. No entanto, para que isso seja possível, é necessário que existam materiais que aguentem temperaturas ainda maiores do que as temperaturas de fusão da maioria dos metais. Esse grupo é denominado de materiais refratários e é normalmente composto por cerâmicas. (MACHADO 2016).

Para que suportem as elevadas temperaturas, os materiais refratários devem ser química, física, mecânica e dimensionalmente estáveis. Além disso, precisam de uma elevada resistência ao choque térmico, para que não trinquem devido ao gradiente de temperatura, e de baixa condutividade térmica, para que consigam manter o calor confinado em uma determinada região. Exemplos de materiais refratários, isto é, que apresentam essas características a elevadas temperaturas, são as cerâmicas, (JONES 1972).

Segundo a Associação Brasileira de Fundição, ABIFA (2015), dentre os materiais refratários mais utilizados nos processos de fusão de metais encontram-se:

- Sílico-aluminosos, que são compostos por cristais de mulita e sílica amorfa. O teor de alumina varia, normalmente, de 42 a 72%, sendo que a refratariedade e o custo elevam-se com o aumento deste teor. A mulita é um composto estável a altas temperaturas.
- Alumina, constituída por alumina fundida (99,5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ou tabular. É altamente refratária, sendo utilizada para superligas e não recomendada quando se deseja uma camada primária com alta condutividade térmica.
- Cristobalita  $\text{SiO}_2$ , produzida a partir da sílica de alta pureza a temperaturas acima de  $1550^\circ\text{C}$ , porém abaixo do ponto em que é formada a sílica amorfa. É utilizada para a produção de peças microfundidas de ligas não ferrosas.
- Sílica fundida, utilizada como componente de lama e como estuco (argamassa resultante da adição de gesso, água e cal) para peças ferrosas e não ferrosas.
- Quartzo, constituído normalmente por 99,5% de  $\text{SiO}_2$ , apresenta grande disponibilidade e baixo custo. Entre os refratários comumente usados é o que apresenta mais estabilidade.
- Zirconita, contém normalmente 67,1% de  $\text{ZrO}_2$  e 32,9% de  $\text{SiO}_2$ . Geralmente são utilizados como estuco da primeira camada, através de chuveiros, devido à sua alta densidade.

É importante ainda destacar que dentre os materiais refratários mais empregados nos processos de fundição encontram-se os cimentos ou concretos refratários, que são usados como revestimentos em fornos, confecção de tijolos, fornalhas e caldeiras.

Além do uso destes tipos de refratários, costuma-se aplicar junto a esses revestimentos a chamada manta cerâmica. A manta cerâmica é um material muito leve, com excelentes características de isolamento térmico/acústico, baixa condutividade térmica, resistente a ataques químicos, óleo ou água. Sua resistência a temperatura varia entre 1260 °C a 1600 °C. (MORGAN, 2018)

## 2.6 A FUNÇÃO DO CADINHO

A finalidade do cadinho é fundir metais e mantê-los em fusão através da transmissão de calor de uma fonte de energia (óleo, gás, carvão ou eletricidade) externa a ele para a carga metálica. Quanto mais eficiente for a transmissão de calor melhor será cumprida a finalidade do cadinho, ou seja, quanto melhor e mais eficiente for o forno que o contém, melhor será o trabalho da fusão. Vale lembrar que a exposição direta do metal a ser fundido à chama do queimador produz perdas grandes por oxidação do metal. A transferência de calor no caso do cadinho dá-se por duas maneiras principais: a condução e a irradiação, (SOCIESC, 2008).

Os cadinhos existem nas mais variadas formas e vários fatores influenciam as diferentes formas e composições de cadinhos, como por exemplo, os tipos diferentes de fornos onde são empregados e os diferentes metais que se deseja fundir. Outra maneira de se analisar as diferenças entre os vários tipos de cadinhos é através de uma análise das propriedades que se deseja de uma cadinho, a forma física do cadinho e a composição do cadinho que pode ser: carbetto de silício ligado a carbono – SiC (30% de grafite, 45% de carbetto de silício); Grafite ligado a carbono – GF (35% de grafite, 12% de carbetto de silício); Grafite – argila– GA (35% de grafite).

**Figura 6: Cadinhos para fundição**



Fonte: Adaptado de Morganite Do Brasil (2005).

As propriedades desejáveis para que um cadinho cumpra sua função da melhor maneira possível são descritas no Quadro 1.

**Quadro 1 – Propriedades dos cadinhos**

Característica	Descrição
a) Boa condutibilidade térmica	Eficiência na transmissão de calor
b) Refratariedade	Capacidade de resistir a altas temperaturas sem perder suas características físicas e dimensionais.
c) Resistência ao choque térmico	Suportar os sucessivos ciclos de aquecimento e resfriamento típicos das condições de operação dos cadinhos
d) Resistência à oxidação	Impedir ou diminuir o grau de oxidação dos componentes carbonáceos da estrutura do cadinho.
e) Resistência química	Suportar o ataque químico proveniente da escória e dos fluxos utilizados na operação.
f) Resistência mecânica	Suportar golpes mecânicos ou mau uso do cadinho durante a operação
g) Forma física	Existem 5 formas físicas básicas para cadinhos que são denominadas de formatos "A", "B", "C", Cilíndricos e Barril

Fonte: Morganite Do Brasil (2005).

## 2.7 O USO DO GÁS GLP

Gás liquefeito de petróleo - GLP, é a mistura formada é produzida em sua grande maioria por moléculas de carbono e hidrogênio (hidrocarbonetos) de três a quatro átomos de carbono. O GLP é incolor e, conforme o teor de enxofre o gás se torna inodoro. Assim sendo, se adiciona uma pequena quantidade de um composto à base de enxofre, a fim de lhe conferir odor para fácil identificação, para o caso de ocorrer uma eventual situação de vazamento. (PETROBRAS, 2013).

Os principais constituintes do GLP são: propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>); propeno (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>); isobutano (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>); n-butano (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>); e buteno (C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>). O poder calorífico do propano é de 49 952 kJ/kg (11 934 kcal/kg), a do butano de 49 255 kJ/kg (11 767 kcal/kg) e o da gasolina de 40 660 kJ/kg (9 714 kcal/kg). Mesmo tendo vários constituintes, o GLP consiste essencialmente de propano e butano, assim o poder calorífico do GLP não varia muito, ficando na faixa dos 47.500kJ/kg, assim como seu P CI ficando na faixa de 11000 kcal/kg (PETROBRAS, 2013).

Segundo Petrobras (2013), a principal aplicação do GLP, em nível mundial, é no cozimento de alimentos, onde no Brasil representa cerca de 80% do consumo deste derivado. Também pode ser utilizado como matéria-prima nos seguintes setores: Comercial: hospitais, lavanderias, restaurantes, padarias, hotelaria, cozimento de alimentos, aquecimento de água, esterilização e climatização; Siderúrgico: fundição, corte e solda de metais; Petroquímico:

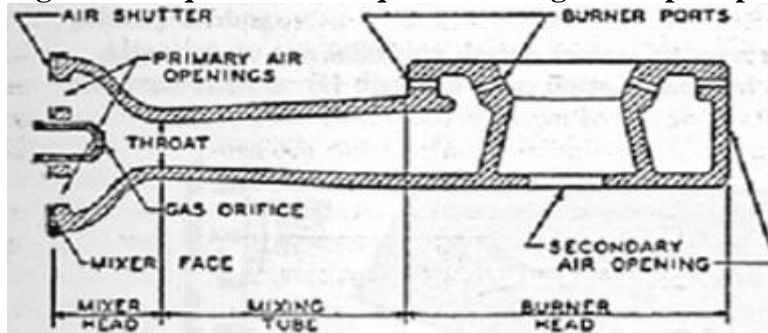
fabricação de borracha, polímeros, álcoois e éteres; Combustível industrial: indústria de vidros, indústria cerâmica, indústria de papel e celulose e indústria alimentícia; Agropecuário: secagem de grãos, controle de pragas e queima de ervas daninhas, aquecimento e esterilização de ambiente de criação de animais

## 2.8 O QUEIMADOR

Segundo Garcia (2002), existem dois tipos básicos de queimadores a gás, e são classificados de acordo como é feita a mistura entre o oxidante e o combustível. Eles são queimadores do tipo aspirante ou do tipo queima direta.

Nos queimadores aspirantes, a maior parte do ar de combustão é aspirado pela expansão do gás combustível em um venturi, onde é misturado o ar e o gás combustível. São queimadores de chama curta, baixa capacidade e baixa razão de redução de queima que é uma medida da flexibilidade de variação de cargas do queimador. São indicados quando é necessária uma distribuição de calor mais homogênea em diferentes condições de tiragem e nos quais seria complicado o ajuste cada vez que virasse a carga, (GARCIA, 2002).

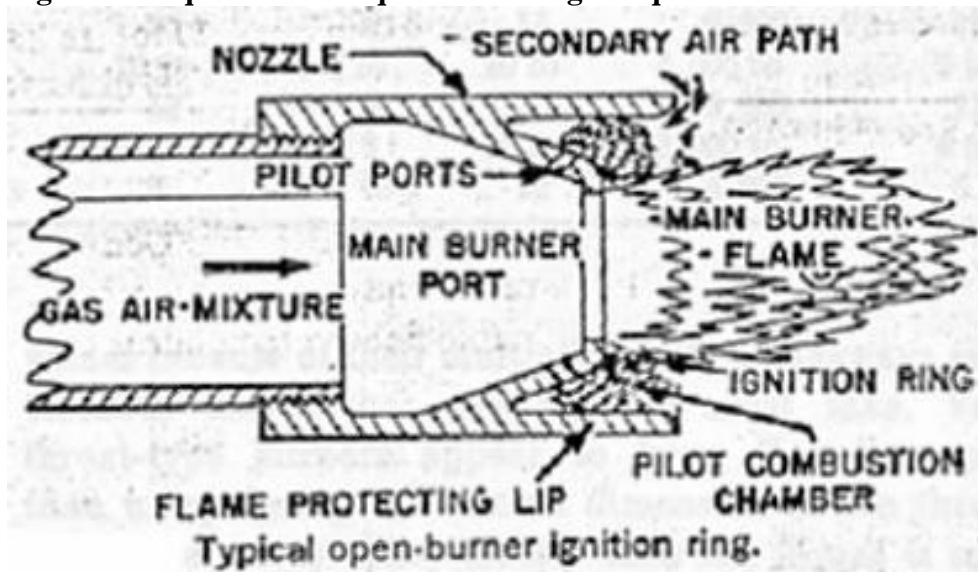
**Figura 7: Esquema de um queimador a gás do tipo aspirante**



Fonte: Adaptado de Garcia (2002).

Em queimadores de queima direta o gás é injetado puro, diretamente na zona de combustão, através de bicos injetores com orifícios de pequeno diâmetro. Estes queimadores apresentam baixo nível de ruído, chamas longas e elevada razão de redução de queima, além da necessidade de ajustes frequentes, já que a vazão de ar é em função da tiragem, que é o processo de alimentação e retirada dos gases de combustão (DANTAS, 2010).

**Figura 8: Esquema de um queimador de gás à queima direta**



Fonte: Adaptado de Dantas (2010).

### 3 METODOLOGIA

A pesquisa é baseada em método indutivo, utilizando o levantamento de dados e hipóteses através de fontes bibliográficas disponíveis, segundo Marconi e Lakatos (2008). A pesquisa tem cunho exploratório, em que as abordagens são relacionadas às melhorias do processo de fundição de alumínio e a utilização de diferentes materiais isolantes térmicos para a construção de um pequeno forno para fundição a cadinho, sendo o gás GLP o combustível usado na fase de experimentação, além de um soprador de ar o qual fornece mais ar para a combustão do gás.

As observações baseiam-se nas interpretações gráficas da cronoanálise dos tempos de fusão do metal e as diferentes configurações entre materiais e técnicas utilizadas.

Será abordada a influência de cada material isolante em relação ao consumo de combustível e os tempos de fusão das amostras. As técnicas para a otimização do processo de fusão do alumínio levam em consideração os diferentes arranjos dos equipamentos.

### 4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Os experimentos foram realizados no período de 27/05/2018 a 05/06/2018, com o objetivo de se obter os tempos de fusão de quatro amostras de alumínio, em quatro diferentes

configurações do forno e dos equipamentos utilizados. As amostras de alumínio são provenientes de outras fusões as quais passaram por um tratamento prévio, onde foram removidas impurezas e consecutivamente pesadas de maneira a se obter massas homogêneas para os quatro testes. Para a realização dos experimentos foram utilizados os equipamentos descritos na Figura 9.

**Figura 9: Equipamentos para fundição**



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Os equipamentos são denominados conforme a numeração:

1. Forno de fundição
2. Manta cerâmica (isolante térmico)
3. Tapa do forno
4. Cadinho de aço carbono ( diâmetro interno 120mm; diâmetro externo 128mm; altura 180mm)
5. Alça de retirada do cadinho
6. Gancho para virar o cadinho
7. Pinça para manipulação de peças quentes
8. Colher para retirada de impurezas do fundido
9. Mangueira para passagem de gás GLP + queimador com regulagem de vazão de gás
10. Amostras de alumínio
11. Soprador de ar
12. Extensor para o bocal do soprador
13. Conjunto extensão elétrica + dimmer (regulador de velocidade do motor do soprador)
14. Protetor facial
15. Luvas de raspa
16. Botijão de gás GLP (P13)

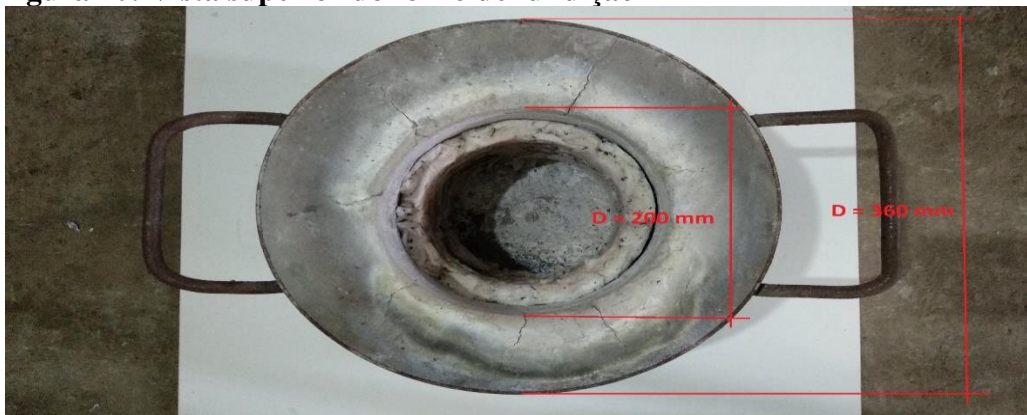
Para a realização dos experimentos foram considerados os seguintes critérios:

- Utilização de EPI's (protetor facial, luvas de raspa e botinas de couro);



- Realização dos experimentos respeitando intervalos de tempo suficientes para o resfriamento do forno até a temperatura ambiente, ou seja, intervalo de no mínimo 24 horas entre uma partida e outra;
- Padronização das massas de alumínio para cada um dos quatro experimentos;
- Abertura máxima da válvula de gás no queimador, para manter a chama acesa, conforme a configuração do equipamento em cada teste;
- Utilização do mesmo cadinho em todas as partidas;
- Colocação da amostra de alumínio no cadinho, posicionamento do cadinho no forno e posicionamento do queimador para posterior acendimento do mesmo;
- Início da cronometragem de cada teste desde o acendimento do queimador;
- Fotografagem da configuração do forno e dos equipamentos em cada teste.

**Figura 10: Vista superior do forno de fundição**



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A Figura 10 mostra a vista superior do forno de fundição onde as medidas dos diâmetros externo e interno são, respectivamente,  $D_{\text{externo}} = 360 \text{ mm}$  e  $D_{\text{interno}} = 200 \text{ mm}$ .

**Figura 11: Vista frontal do forno de fundição**



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A Figura 11 mostra a vista frontal do forno de fundição com as medidas de altura e o diâmetro da entrada do queimador, respectivamente,  $H_{\text{forno}} = 320 \text{ mm}$  e  $D_{\text{entrada do queimador}} = 42 \text{ mm}$ .



**Figura 12: Vista superior do cadinho de fundição**



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A Figura 12 mostra o diâmetro do cadinho de fundição com  $D_{\text{cadinho}} = 128 \text{ mm}$ .

**Figura 13: Vista frontal do cadinho de fundição**



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A Figura 13 mostra a altura do cadinho de fundição com  $H_{\text{cadinho}} = 180 \text{ mm}$ .

O experimento número 1 faz uso de alguns itens em conforme a descrição e demonstrados na Figura 14. A configuração para esta etapa é: Sem uso de manta cerâmica; Sem uso de soprador de ar; Massa de alumínio: 1555 g; Tempo até a fusão: 53:40 minutos; Vazão de gás: aproximadamente 1/4 de volta do registro.

**Figura 14: Pesagem do alumínio para experimento número 1**



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A Figura 14 mostra a pesagem da massa de alumínio para o experimento 1, onde a massa foi de 1555 gramas.

**Figura 15: Forno em operação**



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Na Figura 15, pode-se verificar o forno em operação para a execução do primeiro experimento, sem uso da manta cerâmica e sem soprador de ar.

**Figura 16: Amostra fundida após 53:40 minutos**



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A Figura 16 mostra o cadinho incandescente e a amostra de alumínio fundido, à temperatura de aproximadamente 700 °C. O tempo necessário para a fusão foi de 53:40 minutos.

Já, no experimento número 2 a configuração do forno foi: Sem uso de manta cerâmica; Com uso de soprador de ar; Massa de alumínio: 1554 g; Tempo até a fusão: 39:25 minutos; Vazão de gás: aproximadamente 1/3 de volta do registro, conforme mostra a Figura 17.

**Figura 17: Pesagem do alumínio para experimento número 2**



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Na Figura 17, a balança mostra a massa de alumínio pesando 1554 gramas.

**Figura 18: Forno em operação**



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Acima, a Figura 18 mostra o forno em operação em que não há uso de manta cerâmica mas ocorre o uso de soprador de ar.

**Figura 19: Amostra fundida após 39:25 minutos**



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A Figura 19 mostra a amostra de alumínio fundida após um tempo de 39:25 minutos. Já, o experimento 3 é com uso de manta cerâmica; Sem uso de soprador d ar; Massa de alumínio: 1567 g; Tempo até a fusão: 28:21 minutos; Vazão de gás: aproximadamente 1/3 de volta do registro. Conforme a Figura 20.

**Figura 20: Pesagem do alumínio para experimento número 3**



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

No experimento número 3, a massa de alumínio utilizado foi de 1567 gramas, como mostra a Figura 20.



**Figura 21: Forno em operação**



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A Figura 21 mostra o forno em operação onde ocorre o uso de manta cerâmica e ausência de soprador de ar.

**Figura 22: Amostra fundida após 28:21 minutos**



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Na Figura 22, nota-se a configuração do forno utilizando manta cerâmica. A amostra de alumínio encontra-se fundida após um tempo de 28:21 minutos e encontra-se muito incandescente devido a maior retenção de calor obtido pelo do uso da manta.

No experimento 4 se faz uso de manta cerâmica; Com uso de soprador de ar; Massa de alumínio: 1560 g; Tempo até a fusão: 16:45 minutos; Vazão de gás: aproximadamente 1/3 de volta do registro, conforme a Figura 23.

**Figura 23: Pesagem do alumínio para experimento número 4**



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Para o experimento 4 a amostra de alumínio foi de 1560 gramas como nota-se na balança.

**Figura 24: Forno em operação**



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Conforme a Figura 24, a configuração do forno utilizada é com o uso de manta cerâmica e soprador de ar.

**Figura 25: Amostra fundida após 16:45 minutos**



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A Figura 25 mostra que a otimização do forno de fundição alcança seu auge com a utilização do soprador de ar e da manta cerâmica. Para a massa de 1560 gramas de alumínio, o tempo necessário pra fusão foi de 16:45 minutos.

Conforme os dados do Quadro 2, o experimento número 1 mostra que o tempo de fusão do alumínio sem o uso de recursos para acelerar o processo, como a manta cerâmica e o soprador de ar, torna a fundição praticamente inviável devido ao alto consumo de gás GLP e o tempo demandado.

No experimento 2, o uso de soprador sem o uso de manta cerâmica, demonstra que o tempo de fusão da amostra 2 é 11:04 minutos maior que o tempo de fusão da amostra 3, a qual utiliza apenas a manta cerâmica e sem soprador de ar. Já, o Quadro 2 mostra o resumos dos 4 experimentos.

**Quadro 2: Resumo dos experimentos**

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4
Manta cerâmica	Não	Não	Sim	Sim
Soprador de ar	Não	Sim	Não	Sim
Massa de alumínio (g)	1555	1554	1567	1560
Tempo para a fusão (minutos)	53:40	39:25	28:21	16:45

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Com o uso de manta cerâmica, a capacidade de retenção de calor no interior do forno de fundição é aumentada significativamente, reduzindo o tempo de fusão do alumínio. Somado a isso, o uso do soprador de ar aumenta a combustão do gás e reduz o seu consumo, ao passo que ocorre a redução do tempo de fusão do alumínio, como demonstrado no experimento 4, o qual funde em menos de 17 minutos.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com padronização das massas de alumínio (onde pequenas discrepâncias de peso entre as amostras foram irrelevantes para o resultado final dos experimentos), o uso do mesmo cadinho para os quatro experimentos e as diferentes configurações do forno no qual se agrega o uso de manta cerâmica refratária e o soprador para aumentar a combustão do gás, ocorre a diminuição dos tempos de fusão, e consequentemente o consumo de gás GLP.



No decorrer dos experimentos foi possível notar que o ajuste da potência do soprador no caso em que não havia manta cerâmica, foi mais difícil. Além disso, o ajuste da vazão de gás para manter a chama do queimador acesa, nos casos onde não foi utilizada a manta, também foi dificultado.

A utilização de um cadinho de aço carbono nos experimentos, ao invés de um cadinho profissional, deve-se ao fato de os cadinhos profissionais possuírem um custo elevado, o que inviabilizaria os experimentos. É importante considerar que a vida útil de um cadinho de aço carbono, em relação a um cadinho profissional, é muito reduzida em função dos ataques químicos sofridos no processo de fundição, porém é mais barato e de fácil fabricação.

Os objetivos do trabalho foram atingidos no que se refere a otimização do forno de fundição e também sobre os tempos de fusão. A maior variação de tempo entre os experimentos foi entre o experimento 1 e o experimento 4, sendo de 36:55 minutos. Isso se deve às perdas de calor para as paredes do forno, o que leva a um aumento significativo no consumo de gás e tempo para a fusão da amostra. A otimização da fusão também é resultado direto da melhor alimentação de ar no queimador, o que possibilitou melhor queima do gás e melhor aproveitamento do seu poder calorífico.

## 6 REFERÊNCIAS

ABIFA, Associação Brasileira de Fundição, 2015.

BIRET, J. P. *A future study analysis of the technological evolution of the EAT*. Revue Metallurgie, 2000.

BCS, Incorporated. **Advanced Metal Technologies. Energy Saving Concepts and Opportunities For The Metal Casting Industries**. 2005.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Processo de Fabricação e Tratamento**, São Paulo-SP, Vol.2, McGraw-Hill, 1977.

DANTAS, Marcello Araújo. **Análise do desempenho de um queimador infravermelho funcionando com gás liquefeito de petróleo e glicerina**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

DOTSCH, Erwin. **Inductive Melting and Holding**. Dortmund 2009.

DOYLE, L. E. et al. **Processos de fabricação e materiais para engenheiros**. São Paulo: Edgar Blucher, 1978.

- DUMONT TREINAMENTOS, 2018. Disponível em:  
<https://www.dumonttreinamentos.com.br>. Acesso em 18/04/2018.
- GARCIA, Roberto. **Combustíveis e Combustão Industrial**. Edit. Interciência. Brasil, 2002.
- GROOVER, M. P., **Fundamentals of Modern Manufacturing**, Prentice Hall, 1996.
- JONES, M. F. BERARD, **Ceramics Industrial processing and testing**, The Iowa State University Press, AMES, Iowa. 1972.
- KIMINAMI, C, S; CASTRO, W, B. OLIVEIRA, M, F. **Introdução aos Processos de Fabricação de Produtos Metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.
- KRAJEWSKI, L.; RITZMAN, L.; MALHOTRA, M. **Administração de Produção e Operações**. 8a edição. São Paulo; Pearson Prentice Hall – 2009.
- MACHADO, Ioná Macêdo Leonardo; FREITAS, Alênio Wagner de. **Tecnologia Básica do Processo de Fundição por Cera Perdida**. SENAI-DR.MG: Itaúna. 2016.
- MARCONI. Marina. A. LAKATOS. Eva. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. São Paulo; Atlas;2008.
- MOREIRA, D. A. **Administração da Produção e Operações**. 2a edição; São Paulo, editora Cengage Learning – 2011.
- MORGAN. **Thermo Ceramics**, 2018. Disponível em:  
<http://www.termocom.com.br>. Acesso em 21/04/2018.
- MORGANITE DO BRASIL LTDA. **Manual de fundição a cadinho**. São Bernardo do Campo, 2005.
- NEUSCHUTZ, D., **State and trends of the electric arc furnace technology**. High temperature materials processes, 2000.
- NEUMANN, Clóvis. **Projeto de Fábrica e Layout**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- OLIVEIRA, B. Fundição. Rede e-Tec, 2013. Belém, Julho 2013. Disponível em: . Acesso em: 20 Setembro. 2016.
- PETROBRAS. **Gás liquefeito de petróleo**. Petrobras - BR, 2013. Brasil, Outubro 2013.
- SANTEC. **Engenharia Industrial**, 2018. Disponível em:  
<http://www.reporteroindustrial.com>. Acesso em 23/04/2018.
- SOCIESC – Sociedade Educacional De Santa Catarina 2008.
- WEISS, Almiro. **Processos De Fabricação Mecânica**. Curitiba: Editora Do Livro Tec, 2017. Editora LT. Disponível em:  
<http://www.editoralt.com.br/livros/processos-de-fabricacao-mecanica>. Acesso em 04/04/2018.