



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
DEPARTAMENTO CÂMPUS PAU DOS FERROS
CURSO CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ANTONIO DOMINGOS ALVES

**DESENVOLVIMENTO DE UM FORNO A CADINHO FIXO PARA FUNDIÇÃO DE
ALUMÍNIO**

PAU DOS FERROS

2016

ANTONIO DOMINGOS ALVES

**DESENVOLVIMENTO DE UM FORNO A CADINHO FIXO PARA FUNDIÇÃO DE
ALUMÍNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido -
UFERSA, campus Pau dos Ferros, para obtenção
do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Cláwsio Rogério Cruz de
Sousa.

Coorientador: Prof. Dr. José Flavio Timóteo
Junior.

PAU DOS FERROS – RN

2016

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

A474d Alves, Antonio Domingos.
DESENVOLVIMENTO DE UM FORNO A CADINHO FIXO
PARA FUNDIÇÃO DE ALUMÍNIO / Antonio Domingos
Alves. - 2016.
66 f. : il.

Orientador: Cláwsio Rogério Cruz de Sousa.
Coorientador: José Flavio Timóteo Junior.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2016.

1. Forno. 2. Reciclagem. 3. Alumínio. 4.
Fundição. I. Cruz de Sousa, Cláwsio Rogério,
orient. II. Timóteo Junior, José Flavio, co-
orient. III. Título.

ANTONIO DOMINGOS ALVES

**DESENVOLVIMENTO DE UM FORNO A CADINHO FIXO PARA FUNDIÇÃO
DE ALUMÍNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido -
UFERSA, campus Pau dos Ferros, para obtenção
do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

APROVADA EM: 09/11/2016

BANCA EXAMINADORA

Cláudio Rogério Cruz de Sousa.

Prof.^o Dr. Cláudio Rogério Cruz de Sousa.
PRESIDENTE

José Flávio Timóteo Júnior

Prof.^o Dr. José Flávio Timóteo Júnior.
PRIMEIRO MEMBRO

Prof. Me. José Wagner Cavalcanti Silva.

Prof.^o Me. José Wagner Cavalcanti Silva
SEGUNDO MEMBRO

A minha família e amigos, pois sempre estiveram presentes em minha vida, ajudando e apoiando, sendo minha base e alicerces para seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, por não me deixar desistir e sempre me dar forças para continuar.

Aos meus pais, verdadeiros heróis e maior exemplo de amor, força, coragem e dedicação, por todos os cuidados e ensinamentos a mim passados.

A todos os meus irmãos e irmãs, em especial, minha irmã Conceição Azevedo e irmãos Ambrósio Junior e Antônio Hélio, que me ajudaram do início ao fim dessa caminhada.

A todos os meus professores, que contribuíram de forma incansável nesse processo de formação e desenvolvimento intelectual. Em especial ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Cláudio Rogério, que me ajudou atenciosamente na elaboração desse trabalho.

Aos meus colegas de faculdade, que de alguma forma fizeram parte dessa caminhada.

Aos meus amigos que serão lembrados por toda minha vida, William Vieira, Caio Guilherme, Vinicius Rêgo, Demétrio Cavalcante, Henrique Maciel, Kleber Dantas, por todos os momentos de descontração, amizade, motivação e ensinamentos.

Ao meu amigo Pedro Barbosa, companheiro de todos os dias, por estar presente na etapa final desta caminhada.

A pessoa responsável pelo meu acesso à universidade, sem a sua iniciativa e seus incentivos eu não estaria aqui, serei eternamente grato.

*"Não tenha medo do caminho, tenha medo
de não caminhar."*

Augusto Cury

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um forno para fundição de alumínio provindo da reciclagem desse material. Inicialmente foram realizadas pesquisas a fim de selecionar o forno mais adequado para construção diante de alguns parâmetros como: baixo custo, intervalo de tempo razoavelmente curto, acessibilidade aos materiais necessário e uma operacionalidade fácil. Partindo desses parâmetros, foi selecionado o forno a cadinho fixo. Para a construção desse equipamento, foram seguidas algumas etapas: orçamento, seleção dos materiais, processo metalúrgico, preenchimento de suas partes isolantes e testes no protótipo. Mostrou-se todo o processo construtivo do forno com detalhamento preciso de cada etapa. No entanto, conclui-se que se algum desses parâmetros ou etapas falhar, consequentemente, o aparelho perderá rendimento no desenvolvimento de suas atividades.

PALAVRAS-CHAVES: Forno. Reciclagem. Alumínio. Fundição.

ABSTRACT

This work has as objective the development of an aluminium smelting furnace coming of recycling this material. Initially searches were carried out in order to select the most suitable for oven construction on some parameters like: low-cost, reasonably short time interval, accessibility to materials required and an easy operability. Leaving these parameters, was selected the Crucible Furnace fixed. For the construction of the equipment, were followed a few steps: budget, selection of materials, metallurgical process, filling their insulating parts and testing the prototype. Showed up the whole process of construction with detailing need each step. However, if any of these parameters or steps fails, consequently, the unit lost income in the development of foundries.

Keywords: Oven. Recycling. Aluminum. Foundry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Molde de areia verde-----	24
Figura 2: Forno elétrico a arco. -----	26
Figura 3: Unidade Hidráulica-----	27
Figura 4: Torre de Resfriamento -----	28
Figura 5: Transformador de um forno elétrico-----	29
Figura 6: Forno a indução. -----	31
Figura 7: Forno a resistência elétrica-----	32
Figura 8: Forno Cubilô. -----	34
Figura 9: Forno a Cadinho. -----	35
Figura 10: Processo de reciclagem de latinhas de alumínio.-----	37
Figura 11: Cronograma das atividades. -----	41
Figura 12: Tambor de gás para ar condicionado. -----	43
Figura 13: Tambor de gás aberto. -----	44
Figura 14: Pés de sustentação prontos. -----	44
Figura 15: Processo de fixação dos pés a base do forno. -----	45
Figura 16: Sequência de passos para construção da dobradiça. -----	46
Figura 17: Forno com a tampa fixada. -----	46
Figura 18: Válvula de Escape.-----	47
Figura 19: Cadinho. -----	48
Figura 20: Corpos de prova. -----	50
Figura 21: Cimento Refratário.-----	51
Figura 22: Preparação do cimento para uso. -----	51
Figura 23: Carcaça com o fundo preenchido. -----	52
Figura 24: Preenchimento da tampa. -----	52
Figura 25: Corte superior do furo. -----	53
Figura 26: Carcaça preparada para o preenchimento.-----	54
Figura 27: Cano PVC como molde. -----	54
Figura 28: Forno com as laterais preenchidas. -----	55
Figura 29: Forno concluído. -----	56
Figura 30: Amostras desmoldadas. -----	57
Figura 31: Corpos de prova retirados da estufa. -----	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Lista de materiais para construção.	42
--	----

LISTA GRÁFICOS

Gráfico 1: Variação do número de empregados nas fundições de 2005 a 2016.....	23
Gráfico 2: Relação entre Sucata Recuperada e Consumo Doméstico.	38
Gráfico 3: Reciclagem de Sucata de Alumínio – Brasil.	38

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	12
LISTA GRAFICOS	13
SUMÁRIO	14
1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 PERSPECTIVAS HISTÓRICAS DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO	18
2.2 FUNDIÇÃO DE METAIS FERROSOS	19
2.3 FUNDIÇÃO DE METAIS NÃO-FERROSO.....	20
2.4 PROCESSO DE FUNDIÇÃO	21
2.4.1 Matérias-primas.....	22
2.4.2 Mão-de-Obra	23
2.4.3 Molde	24
2.5 FORNOS DE FUNDIÇÃO.....	25
2.5.1 Forno a Arco Elétrico	26
2.5.2 Forno de Indução.....	30
2.5.3 Forno a Resistência Elétrica.....	32
2.5.4 Forno Cubilô	33
2.5.5 Forno a Cadinho	35
2.6 RECICLAGEM DE ALUMINIO	36
2.7 IMPACTOS AMBIENTAIS.....	39
3. METODOLOGIA DA PESQUISA.....	41
3.1 SELEÇÃO E CONSTRUÇÃO DO FORNO.....	41
3.1.1 Tirada das alças e abertura do tambor	43
3.1.2 Confecção e fixação dos pés	44
3.1.3 Dobradiça e colocação de uma válvula de escape.....	45
3.1.4 Cadinho	47
3.1.5 Testes laboratoriais e preparação da argamassa	48
3.1.6 Revestimento da tampa e do fundo do forno.....	52

3.1.7	Abertura do orifício para entrada do maçarico e preenchimento das laterais	
	53	
3.1.8	Acabamentos e Produto final	55
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1	ANÁLISES	57
4.1.1	Umidade	57
4.1.2	Retração Linear	58
4.1.3	Análise visual do forno após o preenchimento	59
4.1.4	Teste de fundição com o forno alimentado com gás natural.....	60
4.1.5	Teste de fundição com o forno alimentado com carvão vegetal	61
4.2	FORNO	61
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
	REFERÊNCIAS.....	64
	ANEXOS.....	67

1. INTRODUÇÃO

Fundição é um processo de fabricação de peças metálicas, onde a peça é derretida em um forno que dispõe de elevada temperatura, esse processo é o caminho mais curto entre a matéria prima e a peça a ser utilizada. O processo de fabricação de peças por meio de fundição consiste em encher uma cavidade de um molde que contém as dimensões e formatos das peças desejadas com metal líquido.

Em estudos realizados por Fernandes e Sousa (2016), mostra que uma consequência deste processo é que, na maioria das vezes, se faz necessário um acabamento manual ou mecânico nas peças usinadas como, por exemplo, rebarbação, usinagem ou esmerilhamento, pois dependendo do processo empregado - fundição em areia, por gravidade, fundição de precisão – após o esfriamento e endurecimento do líquido dentro do molde, pode haver o aparecimento de rebarba, aspereza ou alguma outra deformidade causada por esses moldes. Pode também ocorrer a soldagem de várias peças fundidas em uma única peça para a obtenção do projeto final.

Partindo do pressuposto que as fundições de metal são realizadas em fornos de alta temperatura, que por sua vez são alimentados pelas mais diversas fontes de energia, surgindo assim, a problemática dos impactos ambientais causados pelos resíduos gerados por essas formas de gerar calor aos fornos.

Entende-se como Impacto Ambiental “qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas, que direta ou indiretamente, afetam: a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos naturais” (art. 1º da res. 1, de 23.1.86 do CONAMA).

Diante dessa problemática, pode-se considerar como grande desafio do setor de fundição, inserir soluções racionais e sustentáveis para o desenvolvimento da produção, ou seja, integrar alternativas que visam à prevenção de impactos, à economia de recursos, matéria-prima e de energia, buscando também a reutilização e recuperação de resíduos.

A indústria de fundição também precisa ser sustentável, bem como outros setores de produção. Para que essa sustentabilidade aconteça é necessário respeitar a comunidade local, valorizando a cultura, incluindo em seus valores empresariais a erradicação do trabalho infantil, dos trabalhos forçados e da discriminação, promovendo a saúde e a segurança, disseminando a

consciência socioambiental e proporcionando condições adequadas de trabalho, principalmente em relação ao consumo de materiais e do impacto ambiental que podem causar.

É pertinente ter conhecimentos dos impactos, positivos ou negativos, que um forno para fundição de metal, pode causar. Positivamente falando, pode-se citar o fato do forno trabalhar com materiais reciclados, como latas de bebidas descartadas e outras sucatas de alumínio que podem ser encontradas nas ruas ou em oficinas.

De acordo com Gaboardi e Verran (2007), o processo de reciclagem de alumínio (Al) a partir da refusão de latas de bebidas descartadas é uma atividade que vem apresentando um significativo crescimento em função do avanço no emprego deste tipo de embalagens e da redução no consumo de energia relacionado com esta reciclagem em comparação com a produção de alumínio primário.

Pesquisas mostram que o Brasil detém um altíssimo índice de eficácia no ramo de reciclagem de alumínio, se pondo inclusive, acima da média mundial. Para que este processo seja realizado, necessita-se a utilização de um equipamento, o forno para fundição, este precisa ser resistente a altas temperaturas, pois é nele que o material é fundido. Esses aparelhos são agentes indispensáveis no processo de fundição, pois possuem diversas características e várias aplicações que são determinadas de acordo com o tamanho da indústria.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

- Desenvolver um forno a cadinho fixo que possa ser alimentado por diversas fontes de calor.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Utilizar materiais de baixo custo na construção do forno a cadinho;
- Mostrar o processo construtivo do forno de baixo custo;
- Realizar teste de fundição em alumínio.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PERSPECTIVAS HISTÓRICAS DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO

Em um artigo publicado na revista BNDES em 2011, Casotti e Bel Filho diz que, embora não haja um consenso, acredita-se que tal processo seja conhecido desde 5000 a.C., quando já se faziam objetos em cobre fundido por meio de moldes em pedra lascada. Uma razão plausível para que o cobre (Cu) tenha sido o primeiro metal fundido pelo homem, de forma não acidental, é o seu ponto de fusão de aproximadamente 1085°C. Ao longo da Idade do Bronze, com início em torno de 3300 a.C., as técnicas de fundição evoluíram. A adição de estanho (Sn) ou arsênio (As) ao cobre formou uma nova liga conhecida como bronze, o que aumentou a dureza do metal e permitiu ao homem produzir armas e armaduras de alta resistência mecânica. Entretanto, por muito tempo, materiais em bronze eram considerados artigos de luxo, de modo que seu uso não era estendido a soldados ou plebeus.

Ainda de acordo com Casotti e Bel Filho (2011), apesar de o minério de ferro (Fe_2O_3) ser encontrado em abundância na natureza, o primeiro fundido de ferro conhecido é considerado relativamente recente, datando de 600 a.C. Trata-se de um tripé de 275 kg produzido na China.

Em Chiaverini (1979), define-se ferro fundido como ligas de ferro carbono com teor de carbono superior a 2%. Entretanto, faz-se a ressalva de que face à influência do silício nesta liga, sobretudo do ponto de vista de sua constituição estrutural, o ferro fundido é normalmente considerado uma liga ternária Fe-C-Si¹, pois o silício está presente frequentemente em teores superiores ao do próprio carbono.

Existem fontes que datam esse processo de fundição antes disso. Ribeiro (2008), indica que o processo de fundição de ferro era conhecido desde de por volta de 1000 a.C., onde chineses já produziam peças de ferro fundido em temperaturas mais elevadas, obtidas em fornos de carvão soprados por foles.

A metalúrgica do ferro tornou-se largamente conhecida só mais tarde, no período romano – de 250 a 100 a.C – onde foi introduzido o carvão no processo de fundição, aumentando a resistência mecânica da peça final, com isso começou a ser aplicada na fabricação de machados, ferramentas, canos e armamentos. (CASOTTI; BEL FILHO, 2011)

¹ Ferro-carbono-silício.

Apenas em 1638 d.C., foram registrados os primeiros estudos científicos sobre a resistência mecânica dos metais à ruptura, realizados por Galileu Galilei. Inovações no método produtivo foram feitas no século XVII, por meio de incarbonização, que consiste na adição de carbono ao ferro – o que daria origem, futuramente, ao aço². O processo de fundição em aço data de 1740 e é atribuído ao inglês Benjamin Huntsman. (RIBEIRO, 2008)

A primeira casa de fundição no Brasil, só surgiu por volta de 1580 na cidade de São Paulo, e era destinada à fundição do ouro extraído nas minas de Jaraguá e arredores. A partir disso foram criadas novas casas de fundição pelo País em cidades de grande porte como, por exemplo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Bahia. O mercado de fundidos inflamou com a alta demanda exigida por ferrovias e portos, fazendo com que as oficinas metalúrgicas do país adquirissem os melhores equipamentos do setor. (BETHELL, 2002)

Portanto, de acordo com Casotti e Bel Filho (2011), a família dos fundidos de ferro tem uma longa história, enquanto a família dos fundidos de ferro que conhecemos e usamos nas aplicações atuais de engenharia datam da metade do último século. Com a chegada da indústria automotiva e a construção de Brasília, o setor de fundição ganhou novo fôlego, cumprindo um importante papel no desenvolvimento da indústria nacional.

Os metais podem ser classificados como ferrosos e não-ferrosos. A seguir será descrito, de forma resumida, algumas técnicas de fusão para obtenção desses ferros.

2.2 FUNDIÇÃO DE METAIS FERROSOS

Os fundidos ferrosos, dependendo de sua composição, podem ser classificados como brancos, mesclados, cinzentos, nodulares, vermiculares, maleáveis e aços.

O ferro fundido branco é obtido como processo intermediário para obtenção do ferro maleável e do ferro mesclado. Por possui características como: elevada dureza, baixa tenacidade, elevada resistência ao desgaste, entre outras, é adequado para fabricação de peças como cilindros de laminação. (CASOTTI; BEL FILHO, 2011)

Em geral, os metais fundidos apresentam contração após a solidificação, que precisa ser bem dimensionada na hora de confecção do molde da peça. No caso do ferro fundido cinzento, o efeito da contração do líquido é, em parte, compensado por uma leve expansão de volume, consequência da precipitação da grafita no momento da solidificação.

² Segundo definição de Chiaverini (1979), o aço é uma liga de ferro-carbono contendo geralmente de 0,008% até cerca de 2,0% de carbono, além de certos elementos residuais resultantes do processo de fabricação.

Já os fundidos nodulares, segundo Casotti e Bel Filho (2011), têm uma adição de nodularizantes que é feita em fornos pressurizados. O tratamento térmico é realizado com a liga em estado líquido e confere ao fundido maior ductilidade, resistência mecânica, tenacidade e resistência à tração. A usinabilidade é comparável à do ferro cinzento. Tal liga apresenta resistência mecânica e ductilidade que se aproximam das características do aço. Peças fundidas como válvulas, carcaças de bombas, virabrequins e pinhões são feitas à base dessa liga.

Segundo definição de Chiaverini (1979), o aço é uma liga de ferro-carbono contendo geralmente de 0,008% até cerca de 2,0% de carbono, além de certos elementos residuais resultantes do processo de fabricação. Seu preparo depende de três componentes básicos: coque (ou carvão vegetal), calcário e minério de ferro.

Segundo Soares (2000), a fusão de ferros fundidos é feita a partir de um carregamento consistindo basicamente de ferro-gusa³, retorno de fundição (ou sucata interna) e sucata de aço, devidamente balanceados para obtenção da composição desejada. Além disso são adicionadas ferro-ligas⁴ para correção de teores dos diversos elementos, sendo que o forno mais indicado para a preparação do metal é o forno de indução.

O processo de fundição de peças em aço é tecnicamente similar ao de fundição em outras ligas ferrosas. As indústrias de fabricação de bens de capital e da construção civil são as maiores demandantes de peças fundidas em aço. Embora o aço não possa ser tecnicamente classificado como “ferro fundido”, os fundidos em aço são classificados como fundidos ferrosos (diferenciando-se dos fundidos não ferrosos, cujas ligas não têm ferro em sua composição). (CASOTTI; BEL FILHO, 2011)

Apesar de serem metais de grande usabilidade, foi previsto por Takata (2002), uma tendência de declínio da fundição desses metais (cinzento, nodular e aço), pois a maior fatia do mercado é voltada para a indústria automobilística e observa-se a substituição dos componentes de ferro fundido por outro material não ferroso como alumínio e magnésio. A principal vantagem do uso destes materiais consiste no fato de serem mais leves. Com a utilização de componentes mais leves, aumenta-se a performance e reduz-se o consumo de combustível do veículo.

2.3 FUNDIÇÃO DE METAIS NÃO-FERROSO

³ Contém alto teor de impurezas, contaminantes (enxofre, silício e magnésio) e carbono.

⁴ Necessitam de elevada tecnologia para sua criação.

Entre os metais não-ferrosos estão o alumínio (Al), o magnésio (Mg), o cobre (Cu) e o Zinco (Zn), metais que possuem pontos de fusão inferior aos metais ferrosos. Esses têm ganhado grande espaço no cenário da indústria, em especial no setor automobilístico, pois são mais leves e dispõem de consideráveis resistências e trabalhabilidade. Será descrito, sucintamente, o processo de fundição dos dois primeiros.

De acordo com Soares (2000), a fusão das ligas de alumínio é feita sob atmosfera neutra com fluxo protetor que minimize a oxidação do banho e a absorção de hidrogênio.

Peças fundidas de alumínio tem uma aplicabilidade expressiva no setor automobilístico, pois possuem características de leveza e resistências mecânica, dentre outras, que são benéficas para a economia dos derivados dessa indústria.

A fusão de ligas de magnésio é bastante similar à de ligas de alumínio com o agravante que os fluxos utilizados para proteção do banho metálico precisam ser menos densos, sendo normalmente empregados fluxos contendo fluoreto de lítio - LiF. (SOARES, 2000)

Vale ressaltar que, por estar trabalhando com produtos que liberam gases tóxicos é importante que o operador use máscara, bem como todos os equipamentos de proteção individual.

Por serem de grande resistência mecânica e peso pequeno em relação aos outros metais, as ligas de magnésio têm uma importante usabilidade na indústria aeroespacial, assim como na indústria automotiva.

Para fundição desses metais, são utilizados fornos elétricos, como o de indução, porém o principal é o de cadinho aquecido a óleo ou a gás por intermédio de um queimador.

2.4 PROCESSO DE FUNDIÇÃO

Para Oliveira (2013), fundição é um processo de fabricação que se baseia na conformação física dos materiais. Historicamente, é o processo de fabricação mais antigo e tecnicamente o mais importante entre os processos de fabricação, pelos seguintes motivos: É um processo extremamente versátil porque existe a possibilidade de se desenvolverem formas elaboradas, com variações no que se refere ao peso da peça, quantidade e qualidade das matérias-primas; E por outros motivos que já foram citados anteriormente.

As peças fundidas adequadamente não têm propriedades direcionais, ou seja, a resistência a tração, por exemplo, é a mesma em todas as direções. Essa propriedade, que é

denominada de isotropia, é de grande importância para engrenagens, anéis de pistão, camisas para cilindros de motores, entre outras (OLIVEIRA, 2013).

Nakata (2002), diz que o objetivo deste processo é obter peças com as propriedades mecânicas desejadas, como perfis, dimensões, tolerâncias e acabamentos requeridos no projeto. Muitas vezes, a peça bruta não atende às necessidades requeridas no projeto e há uma necessidade de melhorar o acabamento através da usinagem, ou ainda melhorar as características mecânicas através do tratamento térmico.

Por apresentar essas particularidades, o processo de fundição se faz completo e ágil do ponto de vista da entrega do produto final. Mas, por outro lado, esse processo em si, é complexo pelo número de variáveis que possui, entre elas: matéria-prima, molde, mão de obra, fornos, impactos ambientais, entre outros.

2.4.1 Matérias-primas

Uma característica da indústria de fundição é o uso intensivo de mão de obra e matérias-primas de origem nacional, beneficiando o empreendimento em uma independência do mercado externo, gerando um número significativo de empregos diretos e indiretos na sua cadeia produtiva.

Tomando como base dados da Associação Brasileira de Fundições (ABIFA, 2016), entre as matérias-primas utilizadas para fundições, destacam-se principalmente o ferro gusa, alumínio e os ferro-ligas.

- I. Ferro gusa é a principal matéria-prima das fundições de ferro. O ferro gusa é produzido a partir do minério de ferro, sendo que o Brasil é o 2º maior produtor mundial deste minério. O ferro gusa assim produzido abastece plenamente o consumo interno permitindo ainda a exportação de aproximadamente 64% de sua produção.
- II. Ferro-ligas, também somos autossuficientes, existindo um excedente que é exportado equivalente a 40% de sua produção.
- III. Alumínio que é básico na fundição de peças, este metal também está em situação privilegiada no país com a terceira maior reserva de minério da bauxita, no mundo. Exporta-se atualmente 40% da produção interna de alumínio.

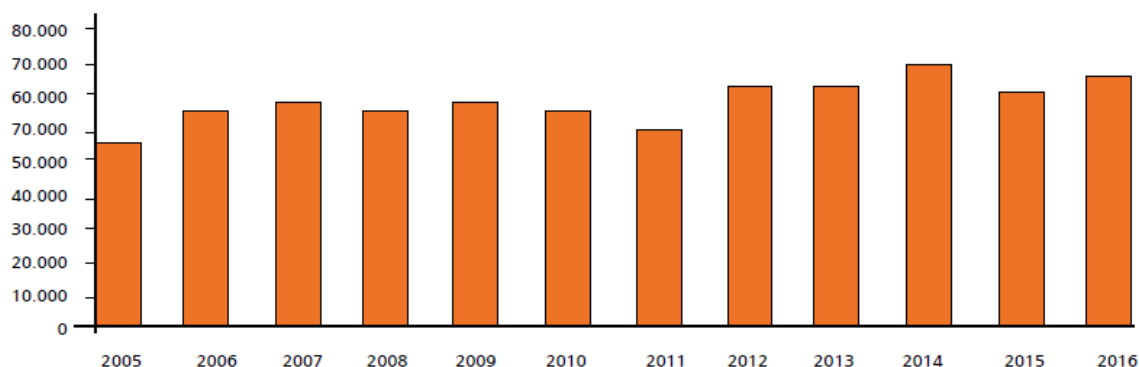
Os dados citados, explicita cada vez mais a independência do mercado brasileiro de fundições. A ABIFA (2016), mostra que diante do cenário mundial, o Brasil ocupa a 7ª posição no ranking de produtores de fundidos, superando países como: Coreia, Itália e França, por exemplo. As condições naturais do Brasil mostram seu potencial de se tornar um dos maiores produtores mundiais.

2.4.2 Mão-de-Obra

Como outros segmentos da economia, a Indústria de Fundição procurou se adequar a uma nova realidade de mercado e ao mundo globalizado onde o aumento da produtividade tornou-se fundamental para sobrevivência das empresas (ABIFA, 2016).

No gráfico mostrado a seguir pode ser observada a variação do número de empregados nas fundições de 2005 a 2016.

Gráfico 1: Variação do número de empregados nas fundições de 2005 a 2016



Fonte: ABIFA, 2016

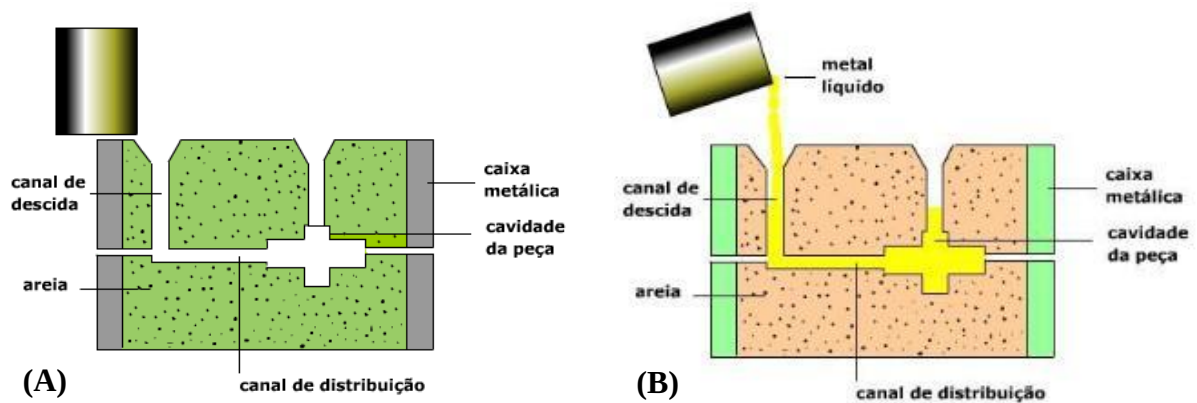
Nota-se pela observação do gráfico 01, um nível de empregados crescente até o ano de 2007, tendo uma queda em 2008, função de uma crise econômica internacional que afetou diretamente na exportação de fundidos, essa queda teve tentativa de recuperação no ano seguinte, não obtendo êxito e vindo a se erguer somente em 2012. A partir deste ano, o mercado sofre oscilações na variação no número de empregados deste setor, obtendo seu maior número de empregados no ano de 2014 e no fim do segundo semestre do ano corrente, obtinha o segundo maior número de empregados.

2.4.3 Molde

Cabe descrever sobre o processo de moldagem para melhorar o entendimento dos fundidos. No entanto, não vale a pena se aprofundar sobre tal aspecto, pois o foco do trabalho é sobre a construção e utilização de um forno de alta temperatura apenas para fusão de alumínio, não objetivando a criação de peças específicas.

Para que se obtenha boas peças fundidas, os moldes precisam ser de ótima qualidade, dessa forma estará evitando que apareça rebarba, aspereza ou outras deformações que podem ser causadas por eles. Estes moldes podem ser de areia verde, areia estufada, em barro, aglomerados com cimento, entre outros. As figuras 01 (A e B) mostram, respectivamente, um molde de areia verde vazio e preenchido.

Figura 1: Molde de areia verde



Fonte: <https://goo.gl/4jAqIZ>

Nas Figuras 01(A e B), percebe-se que o molde é feito dentro de uma caixa metálica, mas essa também pode ser de madeira, desde que seja forte e rígida para que não distorça quando a areia for compactada em seu interior. A depender do tamanho da peça a ser fabricada, esse molde pode ser feito em mais de uma caixa, onde será necessário que elas sejam presas por pinos e buchas para que haja o alinhamento e a fixação adequados e precisos.

Independendo do tipo de material que esse molde será feito, de acordo com Oliveira (2013), para que ele seja bom, precisa apresentar as seguintes características:

- Resistencia mecânica adequada para suportar o peso do metal;
- Resistencia a ação erosiva do metal líquido em escoamento rápido durante o vazamento.

- c) O molde deve gerar uma quantidade mínima de gás quando cheio de metal líquido. Gases contaminam o metal e podem romper o molde.
- d) O molde deve permitir que quaisquer gases gerados durante o vazamento de metal possam passar pelo corpo do molde propriamente dito antes de penetrarem no metal.
- e) O molde deve ser refratário, ou seja, ter estabilidade química, física e mecânica em ambientes de altas temperaturas do metal e soltar-se com facilidade da peça após o resfriamento.
- f) O molde deve ser colapsível suficiente para permitir que a peça se contraia, após a solidificação.

O molde também deve ser feito em uma caixa com dimensões maiores que a peça a ser fabricada, ou seja, é necessário que ele esteja o mais centralizado possível dentro da caixa e que haja sobra para os quatro lados, havendo dessa forma, espaço suficiente para que a areia seja socada até atingir a resistência de contração necessária para não perder as dimensões do projeto quando receber o metal derretido.

Outro fator que torna o processo de fundição complexo, são os equipamentos necessários, e o principal entre eles, são os fornos a serem utilizados para o procedimento, pois precisam de segurança, versatilidade, economia e desempenho. Dessa forma, tentou-se demonstrar os tipos e as formas de utilização dos fornos mais utilizados nesse processo.

2.5 FORNOS DE FUNDIÇÃO

Os fornos são os principais equipamentos para fusão de metais na fundição, cada um desses equipamentos tem uma aplicabilidade industrial específica que depende da escala de produção e do controle metalúrgico do processo.

De acordo com Soares (2000), os fornos construídos para fundição podem ser classificados quanto ao tipo de aquecimento empregado, esses podem ser elétricos - a arco (direto e indireto), de indução (a canal e a cadinho) e de resistência elétrica - ou alimentados por combustíveis - carvão/coque; óleo combustível; gás de petróleo liquefeito (G.L.P.); gás natural, entre outros. Estes fornos podem ser do tipo cuba (alto forno, cubilô); reverberação ou rotativo e de cadinho, com aquecimento externo no mesmo.

2.5.1 Forno a Arco Elétrico

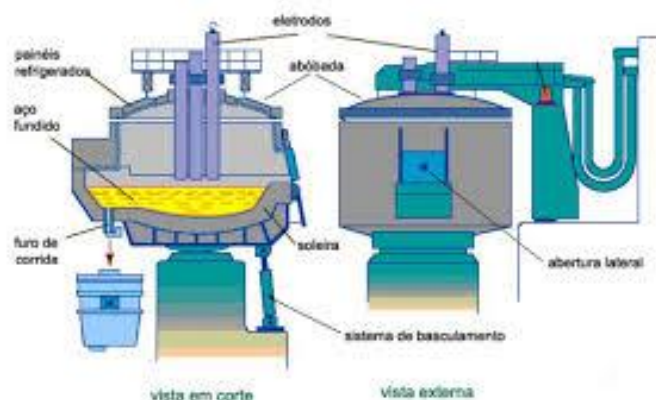
É conhecido por ser um forno capaz de fundir qualquer material. Segundo Candido (2009) os fornos a arco surgiram no começo do século, mais precisamente no ano de 1904, concebido pelo Francês Paul Louis Toussaint Héroult para fabricação de alumínio. No Brasil os primeiros fornos a arco instalados datam da década de 40 e um considerável crescimento no número de instalações foi notado nos anos 70. Nos últimos anos, os investimentos nessa área se concentram na modernização dos equipamentos existentes, visando maior produtividade e qualidade tanto dos produtos finais como das condições ambientais. Isto se nota na implementação de técnicas como painéis refrigerados, sistemas de exaustão de fumos, técnicas de vazamento sem escória, automação do processo sendo que o destaque consiste no aumento de potência específica.

Se por um lado esses equipamentos provocam significativo avanço no setor industrial de fundição, por outro, causam distúrbios nas redes de energia elétrica. São fornos que precisam de muita energia para que tenham um bom funcionamento.

2.5.1.1 Componentes do Forno a Arco

Os fornos a arco são constituídos por diversos componentes, estes podem ser mecânicos ou elétricos. Os componentes mecânicos são: uma carcaça, cuba, eletrodos, tampa do forno ou abóbada, unidade hidráulica e uma torre de resfriamento. Já a parte elétrica do forno é constituída por: transformador, reator, cabos flexíveis, disjuntor, painel de comando e um púlpito de basculamento. Cada um desses componentes tem uma ou mais funções dentro desse conjunto. Podemos observar alguns desses componentes na figura 02.

Figura 2: Forno elétrico a arco.



Fonte: Mattiello (2011)

A carcaça, por exemplo, é construída com chapas de aço, contendo revestimentos internos, material isolante térmico e refratário, geralmente toma a forma circular e é responsável por ter em sua parte interna, a cuba, essa é constituída de um recipiente de aço de grande espessura, isolada termicamente com materiais refratários. A cuba é a parte do forno que se desgasta mais rapidamente, pois é nela que o material é fundido, conseqüentemente, é onde se concentra maior quantidade de calor.

Já os eletrodos são constituídos de um bloco cilíndrico de grafite de comprimento e diâmetro variáveis em função da capacidade do forno. O uso provoca desgaste dos eletrodos, diminuindo o seu comprimento, o que pode ser compensado através de emendas apropriadas e sua função é manter uma potência constante durante o ciclo de operação (REGAGNIN, 2012).

A tampa do forno ou abóbada, segundo Leme (2011), normalmente tem formato côncavo, é constituída de aço revestido internamente por uma camada de material refratário, tanto a cuba como a tampa normalmente resfriadas através de um sistema de refrigeração cujo meio circulante é água.

O forno a arco elétrico possui alguns comandos que são acionados hidraulicamente. Quando o forno se encontra em final de operação com o metal já totalmente derretido é preciso colocar esse metal na panela. Para tal fim, o forno possui um sistema de basculamento. Esse sistema consiste numa inclinação do forno em torno de 91°C até 93°C para que o metal seja vazado nas “panelas coletoras de metal”. A unidade hidráulica é responsável pelo envio de óleo nos cilindros de basculamento, pela abertura da tampa e abertura da porta de carga, onde os operadores fazem o acerto do aço líquido para chegar na composição ideal, vindo a jogar por essa porta ferro liga e fazem também a imersão de oxigênio para fazer o controle do carbono. (LEME, 2011)

Figura 3: Unidade Hidráulica



Fonte: Regagnin (2012)

De acordo com Regagnin (2012), a Torre de Resfriamento é ligada, assim como a estação de bombeamento, a parte de refrigeração do forno. No processo de refrigeração do equipamento, a água é aquecida, trata-se de um ciclo. Em novo ciclo a água tem de novamente estar em temperatura baixa na qual se terminou o ciclo anterior. A Torre de resfriamento faz exatamente essa função. Entre um ciclo e outro a água que já refrigerou as partes do forno entra na Torre para ser resfriada e novamente entra no ciclo de refrigeração. Existem diversos componentes para monitoração da água de refrigeração. Entre eles estão: termostatos, pressostatos, manômetros e fluxostatos com a finalidade de estarem monitorando o tempo todo, a pressão, temperatura e fluxo da água de refrigeração. A figura abaixo mostra uma torre de resfriamento de um forno a arco.

Figura 4: Torre de Resfriamento



Fonte: Regagnin (2012)

A parte elétrica do forno, entre outros componentes, possui um transformador que, segundo Mamede (1989), é um equipamento de fabricação especial, sendo imerso em óleo mineral e refrigerado a água. É necessário que em seu projeto seja previsto os esforços mecânicos causados por frequentes curto circuitos que o transformador sofrera para alimentar o forno. O seu enrolamento secundário tem que ser forte e muito bem preso por braçadeiras especiais. Contrariamente aos transformadores comuns, as bobinas de alta tensão são colocadas próximas do núcleo. O enrolamento primário fica aberto fora do tanque para permitir as mudanças de ligação triângulo ou estrela.

Figura 5: Transformador de um forno elétrico



Fonte: Regagnin (2012)

O Reator é instalado em série para ajustar a reatância do sistema às necessidades de estabilização do arco. O reator possui um certo número de derivações de modo que o ajuste é feito por saltos de reatância através do uso de um comutador de derivações que é comandado a distância pela mesa de controle de operação do forno. Já os cabos flexíveis são condutores de cobre anular resfriados a água e fazem a conexão entre as barras fixas, ligadas ao secundário do transformador do forno, e os blocos móveis fixados no braço do porta eletrodo. (REGAGNIN, 2012)

Os disjuntores são equipamentos de segurança do transformador do forno, esses devem possuir uma elevada capacidade de ruptura, pois são expostos a grandes correntes elétricas. São normalmente de ar comprimido ou a vácuo.

O painel de comando é o componente que inclui todas as funções necessárias para o controle do forno, este pode ser manual ou automático.

O púlpito é uma espécie de “mesa de operação” que geralmente fica próxima à panela, a fim de facilitar a vida do operador. Para que o operador não precise ficar indo até o painel de comando para ligar e desligar o equipamento, o púlpito possui essa função, além da função de parada de emergência. (LEME, 2011)

2.5.1.2 Funcionamento do Forno a Arco

Em sua monografia de especialização em Engenharia Elétrica, Flavio Regagnin (2012), descreve de forma clara e objetiva o funcionamento de um forno a arco. Segundo ele,

os fornos a arco funcionam através de ciclos distintos de operações, iniciando como carregamento do forno e subsequente ignição do arco, terminando com acorrida do metal fundido. Este ciclo, carga-fusão-descarga, é repetido várias vezes num processo siderúrgico. No ciclo de operação do forno a arco, observam-se fases distintas, caracterizando comportamentos diversos do forno em relação ao sistema elétrico.

- i. A primeira etapa realizada é com a estrutura superior (tampa) do forno fora de sua posição (abóbada aberta) para que o carregamento de sucata, denominado de primeiro cesto, seja colocado no forno.
- ii. O período de fusão ocorre após o fechamento da abóbada, o disjuntor do forno é ligado, energizando o transformador e o sistema hidráulico dos braços mecânicos, inicia-se a descida até que a extremidade dos eletrodos faça contato com a carga, começando os arcos voltaicos, esse processo tem duração aproximada de duas horas, notando-se um subperíodo final de 40 minutos, denominado oxidação.
- iii. O período seguinte de refino ou redução tem duração aproximada de uma hora e meia onde as operações metalúrgicas necessárias são feitas nesta etapa, preparando a carga nas características desejadas para o vazamento.
- iv. Atingindo o processo, a fase de refino ou redução, o metal já atingiu a forma líquida, sendo possível manter uniforme o comprimento do arco nos três eletrodos, mediante o uso de dispositivo de regulação automática.

Os fornos a arco possuem um custo com instalação, manutenção e trabalhabilidade, elevado, dessa forma não se aplica a pequenas empresas. Este forno é utilizado em grandes indústrias por proporcionar grandes demandas de serviços e produção, consequentemente, gera um consumo elevado de energia elétrica, chegando a causar distorção dessas correntes quando está em funcionamento.

2.5.2 Forno de Indução

Segundo Leme (2011), a principal função de um forno a indução é trabalhar um metal bruto extraído da natureza afim de se obter uma forma desejada como produto final para determinado tipo de aplicação. Pelo metal ser um elemento com rigidez altamente elevada não é tão simples trabalhá-lo. O forno através de indução magnética consegue derreter o metal para

que posteriormente ele seja trabalhado e assume a forma desejada de acordo com a finalidade do ramo em questão.

Depois da Segunda Guerra Mundial, ocorreu a migração da alta frequência para a média frequência em fornos à indução a cadinhos. Com esse avanço foi possível que se atingisse, na década de 70, uma potência de 21 MW de operação e assim fundir aproximadamente 60 toneladas de metal num curto espaço de tempo. Dessa forma, aquecimento indutivo passou a ser considerado em fundições de ferro como uma tecnologia economicamente viável. (LEME, 2011)

Os fornos a indução eletromagnética, mesmo sendo de geometria diferente do forno a arco, como mostra a figura 06, possui em sua parte mecânica, os mesmos componentes do forno descrito no item 2.4.1.1, a unidade hidráulica, a torre de resfriamento, por exemplo, desenvolve as mesmas funções.

Figura 6: Forno a indução.



Fonte: <https://goo.gl/SwII2c>

A parte elétrica do forno a indução, além dos componentes existentes no forno a arco já apresentado anteriormente, é composta por um conversor de potência e um transformador de linha. O primeiro é capaz de gerar uma tensão e frequências trifásicas ajustáveis, com a finalidade de controlar a velocidade de um motor de indução trifásico.

Já o transformador de linha, como expressa Leme (2011), é responsável em transformar a média tensão em baixa tensão. A tensão no primário, normalmente é 13,8 kV, e a no secundário é de acordo com o tipo do equipamento em questão. Tendo em vista que existem

vários tipos de fornos a indução e para esses, existem vários projetos com diferentes tensões de entrada.

Assim como o forno a arco, o forno de indução é um forno para grandes produções de fundidos, viável para indústrias de grande porte, principalmente no setor automobilístico que necessita de tratamentos intensos no metal extraído da natureza para confecção de peças. Mesmo com as avançadas tecnologias de seus componentes, ainda tem um elevado consumo de energia elétrica.

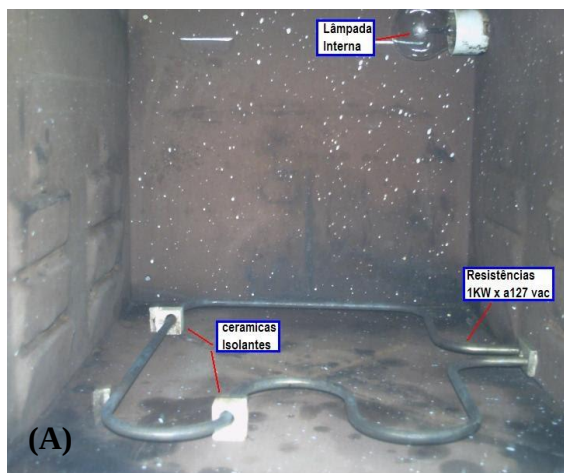
2.5.3 Forno a Resistência Elétrica

O processo mais antigo é utilizar resistências elétricas, um fio com resistividade elevada. A passagem de corrente elétrica no fio, dá origem a produção de calor (efeito Joule). Este processo é utilizado nos irradiadores elétricos de nossas casas, nos fogões elétricos bem como nos fornos elétricos. (JUVENIL, 2016)

De acordo com Soares (2000), esse forno tem sua utilização restrita a ligas de alumínio ou outras não-ferrosas, de baixo ponto de fusão. Pode funcionar bem como forno de espera - manutenção de temperatura e pequenos acertos - para essas mesmas ligas.

Esses fornos podem ser construídos industrialmente, como o forno micro-ondas ou artesanalmente. As figuras 7 (A e B) mostram, respectivamente, exemplo desses dois tipos de fornos.

Figura 7: Forno a resistência elétrica



Fonte: <https://goo.gl/sVndOJ>



Fonte: <https://goo.gl/PgWMrP>

A figura 7A é de um forno industrial, já a 7B de um forno a resistência construído artesanalmente, no entanto, o processo de funcionamento dos fornos é semelhante, ambos são compostos por resistências elétricas que podem variar sua capacidade de aquecimento, são usados isolantes térmicos entre a resistência e a carcaça do forno, afim de tentar manter a temperatura externa o mais próximo da temperatura ambiente.

Esses fornos são diferenciados pela capacidade que suas resistências têm de suportar a temperatura. Essas resistências são alimentadas por correntes elétricas com uma tensão de 220 volts e no caso dos industriais, são utilizados controladores digitais de temperatura.

2.5.4 Forno Cubilô

De acordo com Gomes e Carlos (2013), o forno cubilô surgiu na Inglaterra em 1794, inventado por John Wilkinson, datando aí o verdadeiro surto da indústria de fundição do ferro fundido, mas com características básicas, que foram evoluindo até chegar aos fornos modernos, de última geração e totalmente automatizados. No Brasil, o primeiro forno cubilô moderno foi instalado 1982, na Sofunge, naquela época a maior fundição do país.

Segundo Soares (2000), o cubilô pode ser descrito como um forno de cuba, funcionando em contracorrente, onde o carvão tem a função de ser o elemento combustível e o sustentáculo da carga metálica. O consumo típico de carvão é da ordem de 150 kg/ton. Com isso, o ferro produzido no cubilô pode custar até a metade do obtido em forno elétrico, o que explica a sua não-desativação. Ainda apresenta como vantagem o baixíssimo investimento inicial requerido para sua construção, pois é praticamente um forno artesanal. Em contrapartida, é um forno altamente poluente, de difícil controle, principalmente quando se deseja produzir ferro com baixo carbono equivalente e baixo enxofre. Assim, esse equipamento opera bem para produção de ferros de baixa resistência.

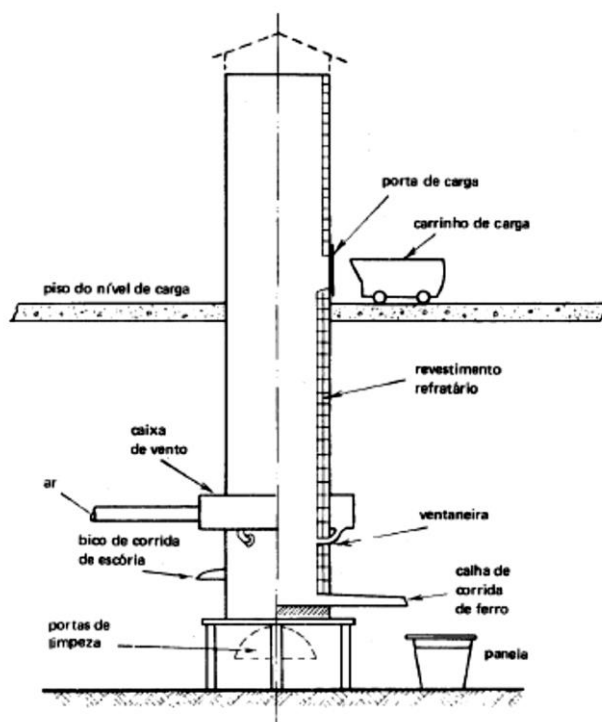
2.5.4.1 Características do Forno Cubilô

Na sua essência o forno cubilô é um forno de fusão, cuja função é derreter a carga metálica utilizando como fonte de calor um combustível sólido.

Conforme Gago e Gardel (2010), o forno cubilô consiste em uma carcaça vertical cilíndrica de aço, revestida de tijolos de material refratário. Ele possui duas portas no fundo para eliminação dos resíduos e logo acima o furo para vazamento do metal. Um pouco acima,

se situa o furo de saída de escória, e a ventaneira, onde o ar comprimido é introduzido no forno. Bem acima está o nível de carregamento do forno. Na operação, a carga composta de metal, combustível (carvão e coque) e uma substância fundente (facilita a separação das impurezas do metal e do carvão – escória) deve ter aproximadamente o peso fundido por uma camada de 15cm de coque. Coloca-se fogo no fundo com madeira e coque e quando a camada de coque tiver atingido o nível das ventaneiras e o fogo tiver atravessado toda a camada, a fusão se inicia até o nível da porta de carga. A operação pode ser contínua ou intermitente. Essa descrição é mostrada na figura 08.

Figura 8: Forno Cubilô.



Fonte: (GAGO; GARDEL, 2010)

O cubilô não produz um metal muito uniforme em relação à composição química e a temperatura não é fácil de controlar, produzindo peças com menos responsabilidade em relação à qualidade. (GAGO; GARDEL, 2010)

Partindo dessa ideia, pode-se concluir que o forno cubilô não é indicado para fundição de peças que exigem grandes precisões, como cilindros para motores automotivos. É um forno bastante utilizado na indústria de fundição nacional pela sua economia e funcionalidade, mas que se faz necessário grandes cuidados pelos poluentes gerados por esse equipamento.

2.5.5 Forno a Cadinho

Segundo Oliveira (2013), são fornos 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. Esses fornos podem ser feitos industrialmente ou artesanal. Para o problema de fusão em pequena escala, é uma solução simples e barata. A figura 09, mostra a esquematização de um forno a cadinho.

Figura 9: Forno a Cadinho.



Fonte: Adaptado de <https://goo.gl/Cm5vK6>

Num empreendimento de pequena escala, será sempre a primeira opção. As razões para essa preferência são a versatilidade em termos de produtividade, que varia apenas com a mudança do tamanho do cadinho. Dessa forma, podem-se fundir de pequenas a 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. (OLIVEIRA, 2013)

De acordo com Gago e Gardel (2010), para fusão de não-ferrosos são utilizados fornos elétricos, como o de indução, porém o principal é o de cadinho, aquecido a óleo ou a gás por intermédio de um queimador.

Tendo conhecimento desse leque de vantagens comentadas anteriormente acerca do forno a cadinho, seu pequeno custo de construção, decidiu-se optar por esse tipo de forno a ser construído e usado na defesa desse trabalho de conclusão de curso.

2.6 RECICLAGEM DE ALUMÍNIO

De acordo com Ribeiro (2012), reciclagem significa qualquer operação de valorização, pelo qual os resíduos são novamente transformados a fim de se obter novos produtos, materiais ou substâncias, recuperando a função original. Inclui o reprocessamento de materiais, mas não inclui a valorização energética, nem operações de aterro. A produção de materiais primários pode exigir quantidades significativas de energia e matérias-primas, pelo que o processamento em materiais “secundários” pode ser ambientalmente mais vantajoso.

O alumínio é um dos principais minerais do grupo dos metais estruturais leves, de grande importância para a industrialização, já que vem progressivamente substituindo o ferro na indústria mecânica e o cobre na indústria elétrica. A demanda por alumínio é alta, pois suas características físico-químicas como: leveza, força, maleabilidade, resistência à corrosão e boa condutividade elétrica, permitem uma variada gama de utilização. (LAYARGUES, 2002)

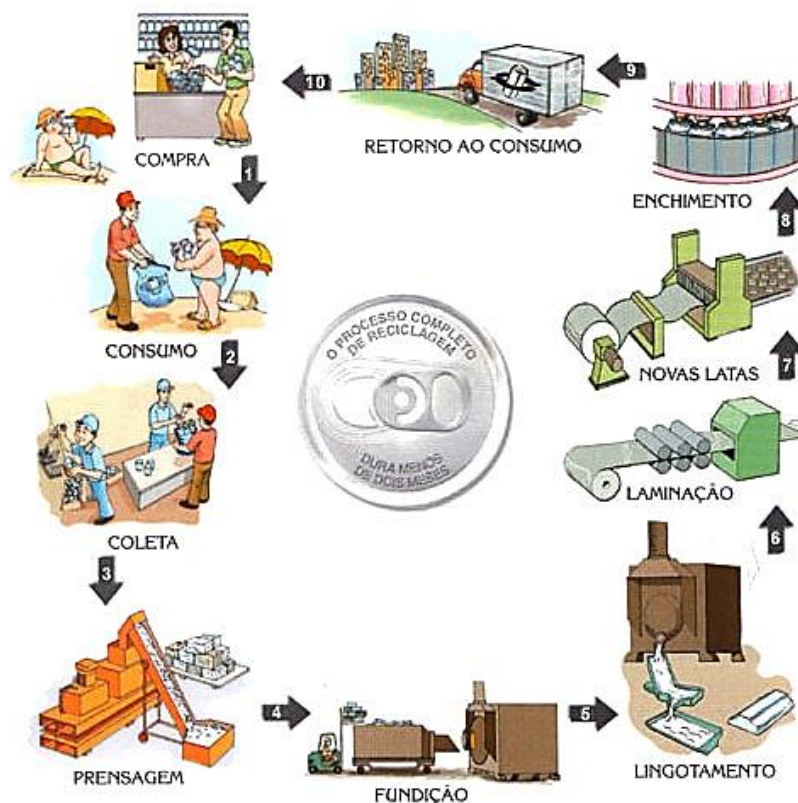
Porém, o alumínio requer um elevado custo para sua fabricação primária, tendo em vista que não pode ser extraído em seu formato original da natureza, dessa forma, se faz necessário e economicamente correto, o processo de reciclagem desse metal. De acordo com estudos realizados por Gaboardi e Verran (2007), a economia de energia associada com a reciclagem de 1 Kg de alumínio representa uma redução no consumo de energia elétrica da ordem de 95% com relação à produção da mesma quantidade de alumínio primário.

O alumínio pode ser reciclado tanto a partir de sucatas geradas por produtos de vida útil esgotada, quanto por sobras do processo produtivo. Utensílios domésticos, latas de bebidas, esquadrias de janelas, componentes automotivos, entre outros, podem ser fundidos e empregados novamente na fabricação de novos produtos. (ABAL, 2016)

Pelo ciclo de reciclagem mostrado na figura 10, observa-se que a partir do terceiro passo (coleta), exige-se que haja uma seleção desse material, pois a partir do momento que essa

lata que acabou de se tornar “lixo”, tiver o mesmo destino de um pedaço de papelão, por exemplo, se tornara mais difícil a sua reutilização.

Figura 10: Processo de reciclagem de latinhas de alumínio.

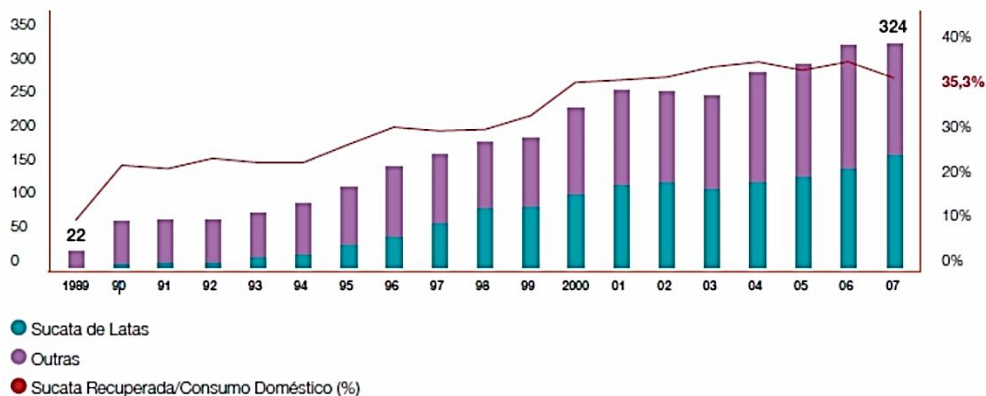


Fonte: <https://goo.gl/DE453o>

Segundo dados da Associação Brasileira de Alumínio – ABAL (2016), hoje a reciclagem de alumínio no Brasil funciona com altíssimos índices de eficácia, acima da média mundial, reciclando praticamente toda sucata disponível. A relação entre este volume e o consumo doméstico de alumínio indica um percentual de 35,2%, que é superior à média mundial de 29,9% (base 2011). Em 2014, o país reciclou 540 mil toneladas de alumínio. Desse total 289,5 mil toneladas referem-se à sucata de latas de alumínio para bebidas, o que corresponde a 98,4% do total de embalagens consumidas em 2014, índice que mantém o Brasil na liderança mundial desde 2001.

O gráfico 02, retirado de um relatório feito pela Associação Brasileira de Alumínio, mostra o índice de reciclagem desse material no Brasil entre os anos de 1997 a 2007.

Gráfico 2: Relação entre Sucata Recuperada e Consumo Doméstico.

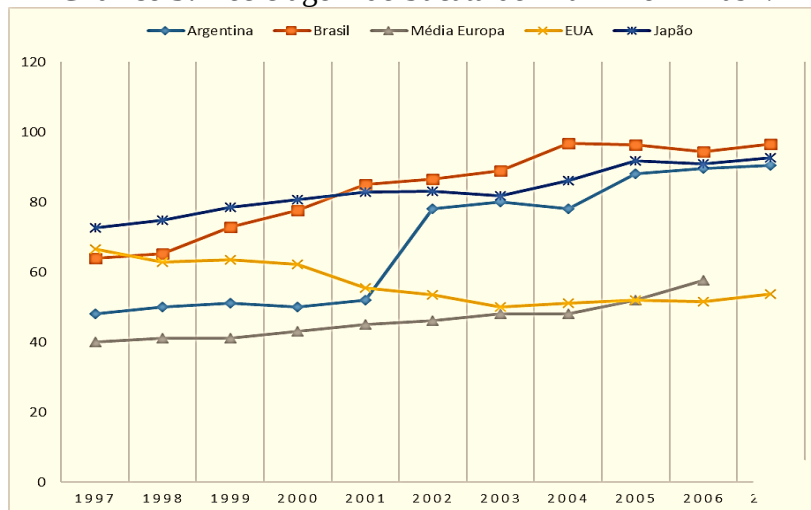


Fonte: ABAL (2007)

Fazendo um paralelo dos dados expressos no gráfico 02 e dos números do parágrafo anterior, percebe-se que o País conseguiu manter, praticamente, o mesmo percentual de reciclagem na relação sucata recuperada/consumo doméstico no período de 2007 a 2011.

Conforme mostrado anteriormente, o Brasil mantém a primeira posição diante dos recicladores de latinhas de alumínio feitas para bebidas nos últimos 15 anos. O gráfico 03 mostra que o País no ano de 2004 alcançou esse índice expressivo e a partir disso vem conseguindo manter seu percentual com pequenas diferenças entre os anos, o que lhe esta conferindo a liderança no ranking de recicladores de latinhas de alumínio pelo mundo.

Gráfico 3: Reciclagem de Sucata de Alumínio – Brasil.



Fonte: Adaptado de ABAL (2007)

2.7 IMPACTOS AMBIENTAIS

Após a Revolução Industrial (Século XVIII), os impactos ambientais negativos decorrentes de atividades empresariais cresceram de tal forma que dúvidas sobre o futuro do planeta começaram a desencadear na população, uma preocupação em relação ao meio ambiente futuro. Do ponto de vista empresarial havia apenas a preocupação em estabelecer maiores lucros, aumentos de produção, não se importando com os impactos negativos que essas atividades poderiam gerar (MEDEIROS, 2012).

Esses impactos ambientais ocasionados pela indústria afeta, assim como o meio ambiente, a população que rodeia o campo industrial poluidor. Como já foi visto nesse trabalho, os fornos de fundição são de fundamental importância para o setor de reciclagem de metais pelo mundo, mas, em contrapartida são grandes causadores de poluição por meio de gases e resíduos que geram durante seu processo de funcionamento.

A partir disso, surge a preocupação de como a atividade industrial atinge diretamente o meio ambiente com essa geração de resíduos poluentes. A seguir, serão elencados alguns dos impactos causados por esses tipos de fornos.

- I. **Alteração da qualidade do ar:** emissão de gases para a atmosfera, material particulado, odor. Atenção especial é dada aos gases gerados pelos fornos que são alimentados por carvão. Vale salientar, que os gases poluentes causam a diminuição da camada de ozônio que, conseqüentemente, provoca o aquecimento global, além de outros fenômenos climáticos que desequilibram o ambiente.
- II. **Contaminação do solo:** alteração ou contaminação do solo, geradas pelas areias que são usadas para fazer os moldes e erroneamente, são jogadas novamente no meio ambiente;
- III. **Esgotamento de Recursos Naturais:** uso, esgotamento ou redução das disponibilidades de recursos naturais renováveis e não renováveis. Sabemos que o Brasil é detentor de fontes imensas de recursos naturais, mas se não houver uma política de sustentabilidade eficiente, esses recursos se esgotarão.
- IV. **Desconforto e/ou risco à saúde:** afeta o ser humano, podendo causar danos à saúde dos colaboradores, terceiros e comunidade, se não estiverem devidamente equipados e protegidos durante os processos de operacionalidade dos fornos.

Problemáticas como estas, fez com que fosse criada uma padronização dos sistemas de gestão ambiental. Dessa forma a Organização Internacional de Padronização ISO (International Organization for Standardization) criou a série ISO14000 que avalia o Sistema de Gestão Ambiental de uma empresa, a qual se certificada, pode divulgar o resultado como um diferencial competitivo.

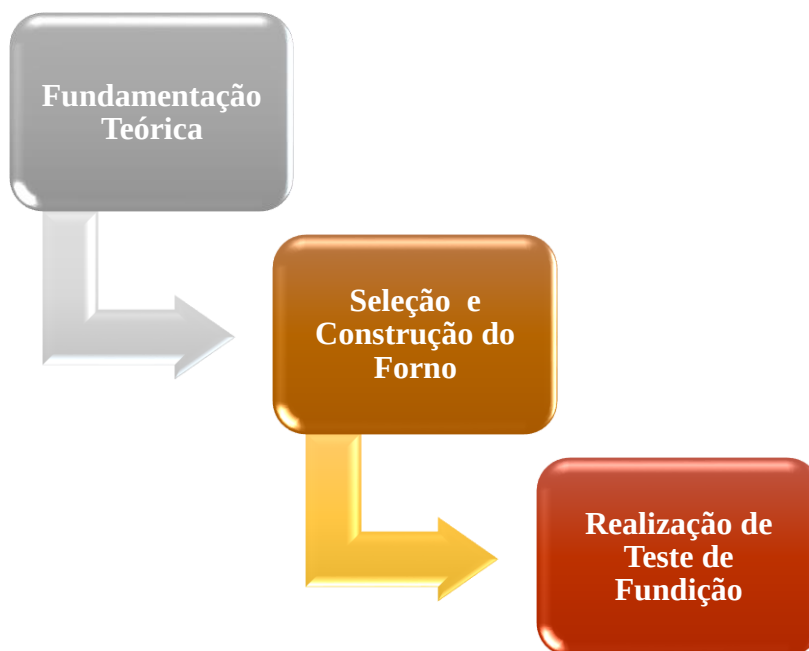
De acordo com Fagundes (2010), o setor de fundição é considerado o mais versátil dentre os de conformação de metal, devido a ampla variedade de formatos, dimensões e propriedades metalúrgicas das peças fundidas. Essas vantagens tornam o setor de fundição comumente mais econômico e viável para obtenção de determinados materiais sólidos. É de extrema importância para o desenvolvimento industrial de um país, pois seus produtos são muito utilizados em processos de fabricação, sendo necessários na composição de outros.

Tomando consciência dos impactos causados por essas indústrias, se faz necessário uma equipe multidisciplinar, para esses profissionais possam auxiliar com melhores discriminações e mensurações, pois pelos motivos positivos citados anteriormente, a indústria de fundição não pode parar, sendo que esta é de crucial importância para a sustentabilidade e economia do País.

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

O estudo se fundamenta no desenvolvimento de um forno a cadinho fixo para fundição de metais não ferrosos como por exemplo, o alumínio. O fluxograma a seguir mostra as etapas que foram adotadas para o desenvolvimento do trabalho.

Figura 11: Cronograma das atividades.



Fonte: Autor.

Conforme o fluxograma apresentado, inicialmente, elaborou-se uma fundamentação teórica por meio de pesquisas realizadas em artigos, livros e diversas bibliografias que estudam a temática. Em seguida, foi selecionado e construído o forno. Posteriormente, realizado testes de fundição de alumínio reciclado no forno.

3.1 SELEÇÃO E CONSTRUÇÃO DO FORNO

Para a seleção do forno a ser construído, considerou-se características como: baixo custo; facilidade de construção; tipo de aquecimento; acessibilidade de materiais entre outras. Partindo dessas características, foi escolhido o forno a cadinho fixo, pois esse pode ser construído com materiais de fácil acesso, em um curto espaço de tempo e seu manuseio é mais simples em relação aos outros.

A partir disso, procurou-se um profissional disposto a executar a parte metalúrgica do processo de construção. Logo após, foi listado e apresentado a ele, os materiais necessários para o procedimento. Em uma visita a oficina no colaborador, observou-se que existia, em meio a sucata, grande parte dos materiais que seriam usados como, por exemplo: pedaços de tubo metálico, cantoneiras, chapas de ferro, entre outros.

No entanto, necessitava-se ainda de uma carcaça externa para o forno, essa precisa ser de material metálico, resistente ao calor, em forma de cilindro e não muito pequena. A partir disso, teve-se a ideia de usar um tambor de gás para ar condicionado, esse possui dimensões de 330mm de altura com 760mm de diâmetro e pode ser encontrado em oficinas de concertar esses aparelhos, encaixando-se perfeitamente no projeto. A relação dos materiais, bem como seus respectivos valores, está mostrada na tabela 01.

Tabela 1: Lista de materiais para construção.

MATERIAL	QNDE	VALOR
Argamassa refratária	10kg	R\$ 180,00
Cadinho de aço	01 und	R\$ 25,00
Chapas metálicas	60 cm	R\$ -
Cilindro de gás	01 und	R\$ -
Parafusos com porcas	12 und	R\$ 2,60
Pedaços de cantoneiras metálicas	30 cm	R\$ -
Pedaços de tubo metálico 20mm	30 cm	R\$ -
Pedaços de tubo metálico 50mm	10 cm	R\$ -
Pedaços de tubo PVC 150mm	30 cm	R\$ -
Pedaços de tubo PVC 25mm	30 cm	R\$ -
Tinta spray alta temperatura	01 und	R\$ -
Processo de soldagem	01 und	R\$ 30,00
Ponta do maçarico	01 und	R\$ 16,00
Carvão vegetal	02 kg	R\$ -
TOTAL		R\$ 253,60

Fonte: Autor.

O tambor doado por uma oficina que conserta ar condicionados - domésticos e automotivos - é mostrado na figura 12.

Figura 12: Tambor de gás para ar condicionado.



Fonte: Autor.

O núcleo do forno, como será para fusão de alumínio, precisa ser de um material que suporte elevadas temperatura, pensando nisso, foi adquirido um cimento refratário que, em suas características, suporta cerca de 1250°C e o seu preparo se dar com o acréscimo gradativo de água (especificações em anexo). Tendo em posse esses materiais, iniciou-se de fato, a construção do protótipo.

3.1.1 Tirada das alças e abertura do tambor

Antes de abrir o tambor, foi retirado suas alças, para isso usou-se uma ferramenta de corte e um martelo. Em seguida, com o auxílio de uma caneta e uma trena, foi feito uma marcação na altura de 240 mm ao redor de toda a circunferência do cilindro, como é possível visualizar da figura 12. Vale salientar que o mesmo se encontrava vazio e na retirada das alças, abriu-se pequenos furos em sua parte superior, o que beneficiou para que possíveis restos de gases saíssem, protegendo dessa forma, qualquer possível incidente que poderia ser causado quando os respingos metálicos gerados pelo instrumento de corte entrassem em contato com esse gás.

Com o cilindro marcado e fazendo uso de uma lixadeira, onde tinha um disco de corte encaixado, dividiu-se o mesmo em duas partes, onde uma seria a tampa do forno e a outra, o corpo. A figura 13, mostra o cilindro devidamente aberto.

Figura 13: Tambor de gás aberto.



Fonte: Autor.

3.1.2 Confeção e fixação dos pés

Para a construção dos pés, usou-se 03 (três) pedaços de tubo metálico de 20 mm de diâmetro com 90 mm de comprimento, os mesmos foram encontrados dentro da oficina em meio a sucatas. Usou-se também, 03 (três) chapas de ferro, encontradas no mesmo lugar, que foram cortadas com uma tesoura especifica nas dimensões de (20 x 60) mm, em seguida foram feitos dois furos nas extremidades de cada chapa com uma broca de 3/16', e os três pedaços de tubo metálico foram fixados com solda elétrica. A figura 14, mostra as peças prontas.

Figura 14: Pés de sustentação prontos.



Fonte: Autor.

Para fixar os pés a base do forno – parte maior – usou-se os ressaltos do fundo para servir de baliza, onde foi feito um furo em cada saliência e com o pé no local, marcava-se o segundo furo. Dessa forma, houve uma distribuição por igual dos pés. Foram usados parafusos e porca de 3/16”, cada pé foi fixado com dois parafusos. A figura 15, representa a sequência do processo descrito acima.

Figura 15: Processo de fixação dos pés a base do forno.



Fonte: Autor.

3.1.3 Dobradiça e colocação de uma válvula de escape

Para construção da dobradiça, foram usados dois pedaços de cantoneira com 2 mm de largura e 100mm de comprimento, a mesma teve em sua extremidade superior, um de seus lados serrado, cerca de 30 mm (figura 16A). Um pedaço de ferro batido, com dimensões de 20 mm de largura com 150 mm de comprimento foi usado para ser preso a tampa do forno com dois parafusos iguais os usados nos pés.

Os dois pedaços de cantoneira, devidamente dimensionados e furados, foram presos a base do forno, com uma distância de 56 mm entre eles, com dois parafusos cada um (Figura 16B). O ferro batido foi dobrado em formato de “C”, sendo que cada uma de suas pontas ficou com 100 mm de comprimento para que sirva de batedeira quando levantar a tampa, os 50 mm que ficou entre as duas pontas, recebeu dois furos com a broca de 3/16” para, posteriormente, ser fixada a tampa do forno com dois parafusos de mesma dimensão.

A figura 16C e 16D, respectivamente, mostram os passos finais da construção da dobradiça.

Figura 16: Sequência de passos para construção da dobradiça.



Fonte: Autor.

Com a dobradiça devidamente feita e fixa nas partes do forno, conectaram-se as duas partes, para isso usou-se um parafuso de 5', após encaixa-lo, percebeu-se uma sobra em seu comprimento, se fazendo necessário serra-lo com a lixadeira. A figura 17, mostra o forno com a tampa fixa em seu devido lugar.

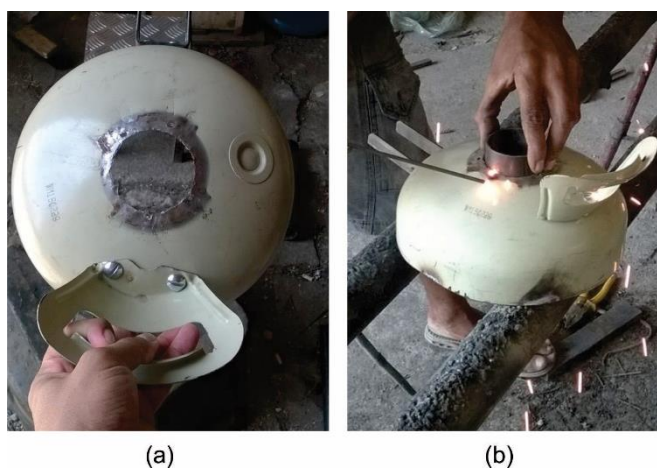
Figura 17: Forno com a tampa fixada.



Fonte: Autor.

Como o forno será aquecido com um maçarico a gás natural, gerará uma pressão em seu interior quando a tampa for fechada, dessa forma é necessário que nela tenha uma válvula de escape para prevenir possíveis acidentes. Sendo assim, foi aberto um furo na tampa com 50 mm de diâmetro, posteriormente, serrou-se um tubo metálico, encontrado na sucata da oficina, com esse mesmo diâmetro e 60 mm de comprimento, logo em seguida, esse tubo foi fixado a tampa superior por meio de solda elétrica. A tampa também dispõe de uma alça para abertura, esse foi feita por uma adaptação de uma das alças tiradas do cilindro. A figura 18 (a e b) mostram, respectivamente, o furo feito na tampa e o processo de soldagem do tubo metálico.

Figura 18: Válvula de Escape.



Fonte: Autor.

3.1.4 Cadinho

Com a carcaça do forno pronta, necessita-se revesti-la internamente no intuito de manter a temperatura externa o mais próximo possível da temperatura ambiente, no entanto, precisa-se que a temperatura interna seja a mais intensa e constante possível, para isso se fez necessário a construção do cadinho ⁵para logo após, fosse determinado o diâmetro interno do forno.

Entretanto, o cadinho precisa ser de um material resistente a elevadas temperaturas, pois é nele que será aquecido o metal a ser fundido. O mesmo será posicionado no centro do forno. Na oficina que estava sendo realizado o processo construtivo, não foi encontrado nenhum material que se adequasse em tais características. Dessa forma fez-se uma visita em outra

⁵ Peça onde o material será fundido.

oficina e lá foi encontrado um tubo de ferro fundido com espessura de suas paredes de 4 mm e um diâmetro externo de 60 mm, desse tubo foi cortado um pedaço de 150 mm, mesmo comprimento que teria o cadinho.

O fundo, usou-se uma chapa de 2 mm de espessura que foi fixada com solda elétrica em uma das extremidades do tubo que se encontrava serrado, formando uma espécie de copo metálico (cadinho), com 60 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento. Posteriormente, foi soldado ao cadinho uma barra de aço que tem em uma de suas extremidades, um cabo de madeira, essa barra serve de alça e a madeira tem o objetivo de proteger a mão do operador de possíveis queimaduras. A Figura 19 mostra o cadinho pronto para uso.

Figura 19: Cadinho.



Fonte: Autor.

3.1.5 Testes laboratoriais e preparação da argamassa

Com a parte metalúrgica estando praticamente finalizada, iniciou-se o processo de revestimento do forno. Inicialmente, seria usada uma argamassa refratária, mas pela grande dificuldade em encontrar esse material no mercado, resolveu-se substituí-la por um cimento refratário, denominado como CIMENTO DRYCEL 34%⁶, produto que mostra em suas especificações (documento em anexo) características fundamentais que permitem o uso para projeto. As especificações do cimento mostravam proporções de água a serem adicionada para o uso do produto em assentamento de tijolos, no entanto, não se tinha as proporções adequadas para preparação se fosse para ser usado com uma função diferente, dessa forma se fez necessário

⁶ DRYCEL é um cimento refratário em pó, de pega hidráulica e cerâmica, acondicionado em sacos de 40 kg cada (DOCUMENTO EM ANEXO).

a realização de alguns testes de laboratório para determinar parâmetros como: umidade, retração e uma estimativa para o tempo de desmolde do produto.

Se faz pertinente obter conhecimento desses índices, já que a umidade pode ser calculada pela equação 01 e irá estimar a quantidade de água que deve ser adicionado ao cimento para se obter uma boa consistência.

(1)

$$h\% = \frac{M_u - M_s}{M_u} \times 100$$

O cálculo da retração em porcentagem pode ser realizado por uma equação similar a (01), no entanto, ao invés de usar-se as massas, serão usadas as dimensões de diâmetro e comprimento. Essa retração irá estimar um percentual de diminuição de volume que esse cimento sofrerá após o período de cura, ou seja, quando enrijece.

(2)

$$X\% = \frac{U_i - U_f}{U_i} \times 100$$

Onde,

X = Retração em porcentagem;

U_i = Comprimento ou diâmetro inicial da amostra;

U_f = Comprimento ou diâmetro final da amostra.

3.1.5.1 Preparação dos corpos de prova

Para realização dos testes foram utilizados três corpos de prova dimensionados com o auxílio de um paquímetro digital (figura 20a), em seguida foi pesado 550g do cimento seco em uma balança com precisão de 1 g (Figura 20b), logo após foi adicionado água até chegar a uma consistência adequada. Encontrada essa consistência, foi pesado novamente o cimento homogeneizado, 721g, todas as medidas foram devidamente anotadas para posteriormente serem usadas nos cálculos. A figura 20 a seguir mostra os materiais usados para as medições.

Figura 20: Materiais de laboratório.



Fonte: Autor.

Os corpos de prova preenchidos e em repouso, figura 21.

Figura 21: Corpos de prova.



Fonte: Autor.

Com a proporção de água determinada, foi possível preparar a argamassa em uma quantidade maior para iniciar-se o processo de revestimento do forno, bastava-se apenas pesar a massa a ser utilizada e calcular a quantidade de água a ser acrescentada. As Figuras 22 e 23 a seguir, mostram respectivamente, o cimento e o seu preparo para uso.

Figura 22: Cimento Refratário.



Fonte: Autor.

Na figura 23.a, é mostrado o cimento selecionado para o processo ainda em seu estado “virgem”, em seguida é mostrado ele sendo misturado com água (figura 23.b), esta água foi adicionada de acordo com a proporção determinada em laboratório. A figura 23.c mostra a massa devidamente homogeneizada.

Figura 23: Preparação do cimento para uso.



Fonte: Autor.

3.1.6 Revestimento da tampa e do fundo do forno

Quando foi obtido a consistência desejada do cimento, foi medido 170 mm a partir da borda superior da carcaça do forno e feito marcações com um pincel em sua circunferência, essas marcações serviriam de baliza para saber até onde se colocaria a argamassa no fundo do recipiente. A Figura 24 mostra a carcaça com o fundo preenchido.

Figura 24: Carcaça com o fundo preenchido.



Fonte: Autor.

Para o preenchimento da tampa, foi necessário usar um copo de vidro servindo de molde, que foi encaixado na válvula de escape e recebeu uma fina camada de óleo para que pudesse ser desmoldado com maior facilidade. A Figura 25 (a e b) mostram o copo devidamente encaixado e a tampa do forno preenchida, respectivamente.

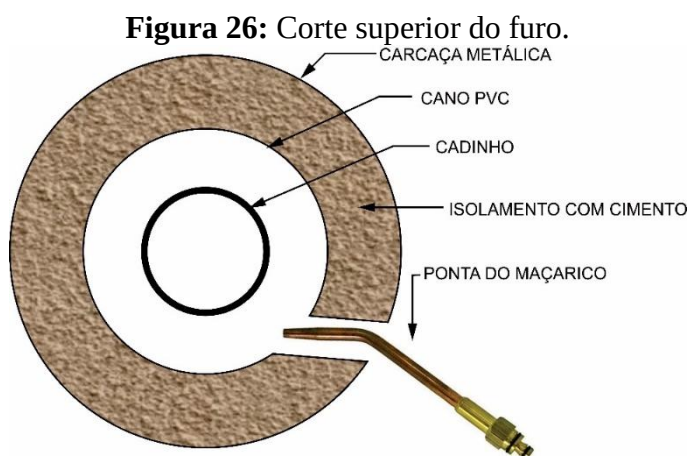
Figura 25: Preenchimento da tampa.



Fonte: Autor.

3.1.7 Abertura do orifício para entrada do maçarico e preenchimento das laterais

Sabe-se que o forno será alimentado por um maçarico, ou seja, se faz necessário um orifício para que o bico da ferramenta de aquecimento possa ser penetrado. O fogo que sairá da ponta do maçarico deve ter uma espécie de movimento circular dentro do forno para que o calor seja distribuído o mais uniformemente possível ao redor do cadinho. Após 72 horas de pega do cimento, foi medido 50 mm do revestimento do fundo do forno e feito um furo com diâmetro de 33 mm de forma transversal na lateral da carcaça, esse furo seguiu a mesma direção até encontrar o cano de PVC que serviria de molde para o preenchimento das laterais do forno. A Figura 26 mostra uma vista superior, de um corte feito no forno na altura do furo.



Fonte: Autor.

Logo após, a carcaça foi preparada para receber o revestimento lateral. Para isso, usou-se como molde do diâmetro interno, um cano PVC com 150 mm, para que este ficasse precisamente no centro, foi feito um cálculo para determinar a diferença de raio entre a carcaça metálica (cilindro) e o cano usado, onde obteve-se uma diferença de 45 mm. A partir disso foram feitas quatro escoras de madeira em forma de “L” que tinha uma de suas extremidades medindo 45 mm, exatamente a diferença entre os raios do cano e da carcaça. Usou-se também um cano PVC com diâmetro de 25 mm para moldar o orifício que passaria o bico do maçarico. A figura 27 mostra a estrutura montada para receber o preenchimento.

Figura 27: Carcaça preparada para o preenchimento.



Fonte: Autor.

É importante lembrar que o cano usado para moldar o interior do forno, foi serrado ao longo de seu comprimento e revestido com uma fina camada de óleo, esses procedimentos foram realizados com o objetivo facilitar a desforma. Para que a parte serrada do cano ficasse fixa no local de origem, usou-se uma fita adesiva transparente. Neste cano também foi feito um furo com as mesmas dimensões e altura do furo da carcaça metálica. A figura 28 mostra o cano após esses procedimentos.

Figura 28: Cano PVC como molde.



Fonte: Autor.

Após a montagem da estrutura, foi realizado o procedimento de preenchimento das laterais do forno. Ao longo da colocação da argamassa na cavidade, tinha-se cuidado para que ficasse o menor número de vazios possível, para isso foi um pedaço de cano PVC que servia de soquete da argamassa na medida que ela fosse sendo adicionada as a carcaça. A figura 29 a seguir mostra o resultado deste processo.

Figura 29: Forno com as laterais preenchidas.



Fonte: Autor.

Com o preenchimento concluído, esperou-se por 24 horas e levou-se o forno a uma estufa onde permaneceu por 24 horas a uma temperatura de 100°C, procedimento realizado a fim de acelerar o tempo de pega e desmolde do cimento. Nesta etapa foram detectadas algumas anormalidades sofridas pelo cimento. O forno, posteriormente, foi submetido a um aquecimento com carvão natural, o que fez com que essas anormalidades fossem agravadas.

Logo após, foi preparado um pouco do cimento e realizado os devidos concertos no aparelho para que fosse submetido a testes de fundição do alumínio. Nesses testes foram usadas duas fontes de energia, no primeiro o forno foi aquecido com um maçarico alimentado com gás natural, no dia seguinte o aparelho foi submetido a um novo teste, dessa vez usou-se carvão vegetal como fonte de calor.

3.1.8 Acabamentos e Produto final

Após a realização dos testes com as duas fontes de calor, foram realizados os acabamentos finais no forno. Primeiramente colocou-se alças para transporte, pois percebeu-se que depois de pronto o forno tinha um peso razoavelmente elevado, sendo de grande importância o uso das alças. Logo após, foi feito um lixamento no intuito de tirar as rebarbas e respingos de cimento que estavam presas nas partes externas no aparelho.

Por fim, foi realizado o processo de pintura, para isso usou uma tinta spray de cor prata resistente a altas temperaturas. A figura 30 mostra o produto final do processo construção.

Figura 30: Forno concluído.



Fonte: Autor.

Em concordância com o objetivo do trabalho, no qual é a construção do forno tipo cadinho fixo, no tópico a seguir será discutido mais detalhadamente os resultados do processo de fabricação e de testes realizados com o aparelho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISES

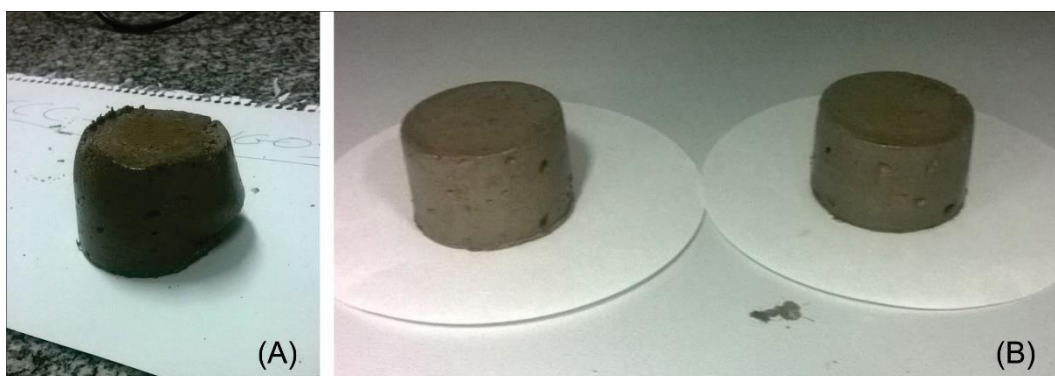
4.1.1 Umidade

Nesta etapa, buscou-se analisar alguns índices dos corpos de prova, fazendo uso da equação 01 e das quantidades medidas em laboratório, obteve-se o teor de umidade da mistura de aproximadamente 24% de água, ou seja, 2,4 g de água para cada 10 g de cimento.

Após 24 horas dos corpos de prova em repouso, tentou-se pela primeira vez fazer o desmolde onde não foi obtido êxito, pois a amostra ainda se mostrava muito úmida. Então esperou-se por mais 24 horas para repetir o procedimento e mais uma vez, pelos mesmos motivos, falhou. Somente após 72 horas foi possível realizar o desmolde com segurança, nesta etapa ocorreu uma deformação lateral em uma das amostras, a anormalidade possivelmente foi consequência da falta de lubrificante no molde, no entanto, as outras duas foram desmoldadas perfeitamente.

A figura 31(A) tem a amostra defeituosa, já na figura 31(B) é mostrado os corpos de prova que serão levados adiante nos testes, no entanto, é possível observar neles o aparecimento de cavidades em suas laterais, fato pode estar associado a má distribuição da matéria prima dentro do molde para o ensaio. Isto poderia ter sido evitado se tivesse usado um palito de madeira, por exemplo, para ir compactando a massa na proporção que fosse sendo adicionada ao recipiente.

Figura 31: Amostras desmoldadas.



Fonte: Autor.

A deformação causada na amostra da figura 31(A), não a possibilitou de ser usada na continuação do experimento. Dessa forma, somente as amostras 31B foram levadas a estufa e deixadas por 24 horas a uma temperatura de 100°C.

Após esse intervalo de tempo, as amostras foram retiradas e observou-se o aparecimento de pequenas fissuras na parte superior em uma das amostras, como mostrado na figura 32.

Figura 32: Corpos de prova retirados da estufa.



Fonte: Autor.

Possivelmente, o aparecimento dessas fissuras ocorreu devido a evaporação rápida da água causada pela alta taxa de aquecimento que o material foi submetido. Outra causa para o fenômeno pode ter sido a dimensão da estufa, pois por se tratar de um núcleo relativamente grande em relação as amostras, necessitava-se de uma maior quantidade de calor para uniformizar seu interior na temperatura do ensaio, bem como a evaporação de elementos de baixa massa molar presentes no cimento, podendo melhor ser aferido esse resultado com uma análise térmica e análises fluorescência de raios X antes e após o processo de formulação da massa.

4.1.2 Retração Linear

Após a secagem das amostras no forno, foi possível calcular a retração sofrida pelo cimento nesse processo de secagem rápida. Tinha-se conhecimento das dimensões dos moldes utilizados para o teste, daí realizou-se um cálculo para obter a média das dimensões das amostras após a secagem, dessa forma obteve-se: $D_{\text{médio}} = 55,65 \text{ mm}$ e um $L_{\text{médio}} = 37,26 \text{ mm}$.

Com isso, foi calculado em porcentagem, a retração sofrida pelas amostras e considerou-se a média entre elas. Para os cálculos, usou-se a equação 02, onde foi obtido 5,7% de retração no diâmetro e 8,7% em seu comprimento. Fenômeno ocasionado possivelmente, pela evaporação da água, de gases formados no interior da amostra e de possíveis elementos de baixa massa molar presente no material.

4.1.3 Análise visual do forno após o preenchimento

Após cada etapa de preenchimento do forno, esperava-se 72 horas para fazer a seguinte, pois foi esse o tempo estimado de desmolde determinado no laboratório, no entanto, após o preenchimento das laterais esperou-se apenas 24 horas e o levou a estufa. Esse procedimento foi de encontro ao realizado nos corpos de prova e consequentemente, ocasionou algumas imperfeições no revestimento do forno.

Logo nos primeiros minutos foi observado uma expansão da massa, fato ocorrido devido a elevada temperatura que estava sendo submetida. Neste caso, a água presente na mistura tendia a evaporar de forma acelerada gerando gases que causava expansão elevada do material. Dessa forma, optou-se por fazer a retirada do material expandido e diminuir em 50% a temperatura da máquina. Passado algum tempo com uma geração menor de calor, observou-se que a expansão tinha sido controlada de forma a não ser mais perceptível. Então, a estufa foi novamente colocada a 100°C e esperou-se cerca de duas horas, logo após foi realizado mais uma observação onde foi constatado que não estava mais acontecendo anormalidades visíveis a olho nu.

Após 24 horas dentro da estufa, o forno foi retirado e realizado o desmolde, onde observou-se que o cimento tinha sofrido uma retração no seu diâmetro e no comprimento, bem como, pequenas fissuras na parte superior (em destaque), mas de acordo com os testes laboratoriais, isto já era esperado. Essa imperfeição é mostrada na figura 33, a seguir.

Figura 33: Forno após 24 horas de estufa.



Fonte: Autor.

Fazendo uma analogia aos corpos de prova, é aceitável afirmar que essas imperfeições foram causadas pelos mesmos motivos citados no item 4.1.1 deste trabalho, desta forma estima-se que a diminuição do diâmetro foi de aproximadamente 5,7%. Essa diferença fez com que o revestimento soltasse da carcaça metálica do forno na parte superior.

A diminuição do comprimento, além dos 8,7% que foi constatado nos corpos de prova, ainda se somou à retirada do material expandido visto na primeira observação do forno dentro da estufa. Assim, não foi possível estimar com precisão a perda de comprimento sofrida pelo cimento.

Após o aquecimento realizado pelo carvão, foi detectado que as fissuras na parte superior do revestimento lateral, tinha se prolongado até a base do forno, fato ocorrido possivelmente, pelo aparecimento de fissuras internas na estrutura quando estava dentro da estufa, assim, quando o material foi submetido a uma temperatura impressa pelo carvão, as fissuras internas se expandiram até as partes externas do revestimento.

4.1.4 Teste de fundição com o forno alimentado com gás butano

Com aproximadamente 10 minutos de aquecimento com um maçarico alimentado por gás natural, tocou-se com a mão na carcaça do forno que se encontrava a uma temperatura próxima da temperatura ambiente. Após esse intervalo de tempo, a tampa do aparelho foi aberta

e pôde-se sentir uma grande massa de ar quente vinda do seu interior, o cadinho já havia adquirido uma cor avermelhada no local onde a ponta do maçarico encontrava-se mais próximo, comprovando dessa maneira o alto teor de aquecimento ao qual estava sendo submetido.

Nesta etapa, não foi alcançado o objetivo final que era de fundir as latinhas depositadas no cadinho, no entanto, observou-se que o forno tem um alto nível de aquecimento e o cimento um forte poder de isolamento. Mesmo sem a disponibilidade de aparelhos que pudessem comprovar isso numericamente, pôde-se comprovar visual e através do toque no instrumento de fundição, tais fenômenos.

O fato do forno não ter adquirido temperatura suficiente para ocorrer a fusão do material, aproximadamente 660°C , pode estar relacionado com a grande circulação de vento que tinha no local do teste, o que fez com que a chama fosse apagada por duas vezes.

Outra observação realizada após o desligamento do gás, foi no revestimento do forno, onde foi detectado visualmente que este não sofreu nenhuma alteração, mostrando ter estabilidade a altas temperaturas.

4.1.5 Teste de fundição com o forno alimentado com carvão vegetal

Os testes realizados com carvão vegetal também não tiveram sucesso em relação a fundir o material, este fato pode estar associado ao pequeno núcleo do forno que, consequentemente, suportava pouco material para a queima, dessa forma, não alcançou a temperatura suficiente para fundição do alumínio.

Uma possível forma de resolução desse problema, seria aumentar o diâmetro interno do forno, sendo possível o depósito de uma quantidade maior de carvão, o que iria proporcionar maior geração de calor que, possivelmente, chegaria a atingir a temperatura necessária para fundição do alumínio, cerca de 660°C .

No entanto, mais uma vez foi observado visualmente e através do contato físico, a boa performance do forno em relação a isolamento e aquecimento do seu interior.

4.2 FORNO

A forno a cadinho fixo, se fez pertinente na escolha do tipo de forno a ser construído, pelos motivos já citados anteriormente. Mas, quando se diz respeito ao baixo custo, que foi o pontapé inicial para escolha, saiu-se um pouco fora do planejado inicialmente, pois era previsto

o uso de uma argamassa que é comercializada em sacos de 5 kg e possui um valor razoável, cerca de R\$ 22,50 o saco, para a construção, seriam usados 02 sacos (10 kg).

No entanto, essa argamassa, não foi encontrada disponível no mercado, vale salientar que foram realizadas pesquisas em mercados de outras cidades e outros estados. A partir disso, esse material foi substituído por um cimento refratário que é comercializado em embalagens de 40 kg a um valor de R\$ 180,00, fugindo um pouco do aspecto de baixo custo financeiro. Mas, é importante frisar que só foram usados cerca de 25% deste cimento, ou seja, se fosse feito uso de todo o material, seriam construídos 04 fornos com um único saco.

Outro ponto importante, foi a facilidade de construção e a acessibilidade de materiais, onde não se teve nenhum tipo de obstáculo ou dificuldade no desenvolvimento dessas tarefas, reafirmando o que tinha sido pretendido no momento da escolha.

O forno a cadinho é de fácil utilização, dessa forma pode ser facilmente manuseado por qualquer indivíduo que desenvolva interesse para tal. Pode auxiliar de forma positiva aos pequenos recicladores de alumínio, pois pode ser usado com diversos tipos de combustíveis, tornando-se econômico até mesmo para quem recicla em pequena escala.

Devido as dimensões do aparelho construído, ele se torna limitado para grandes fundições, tornando seu uso mais apropriado para pequenos recicladores, onde conseguiriam diminuir consideravelmente o volume de produtos como latinhas de alumínio, pois poderiam ser fundidas e passar a ocupar pequenos espaços nos ambientes desses trabalhadores.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em virtude dos resultados obtidos, conclui-se que para a construção de um forno para fundição de alumínio eficiente e que seja de baixo custo, é necessário seguir algumas etapas indispensáveis como: dimensiona-lo adequadamente, fazer uma seleção precisa de materiais, usar um isolante térmico eficiente e para sua utilização, uma fonte de energia eficaz.

Necessita-se também de um profissional na área da metalurgia para realização dos processos mecânicos que foram evidenciados na metodologia deste trabalho, como por exemplo, os processos de soldagem, corte do projétil por meio de ferramentas elétricas, bem como os serviços que exigem uma mão-de-obra qualificada.

O forno para fundição de alumínio foi construído para oferecer ótimo custo/benefício, tendo inúmeras vantagens tais como, baixo consumo de combustível, baixa perda térmica, velocidade de fusão do material e segurança na operação do equipamento. O forno construído detém o maior número dessas características, o que o torna acessível à pequenos negócios no setor de fundição. Dada sua utilização em pequena escala, o forno a cadinho fixo causa impactos ambientais irrelevantes.

No entanto, o não cumprimento ou a má execução de alguma das etapas citadas anteriormente, ocasionara no insucesso do produto final, afetando negativamente de forma direta as vantagens que podem ser oferecidas pelo equipamento.

É aconselhável que em possíveis futuros trabalhos no âmbito de construção de fornos, seja antes de tudo, planejado com precisão afim de evitar erros grosseiros no processo de execução. Por fim, destaca-se o sucesso na construção do forno a cadinho fixo para fundição de alumínio, mesmo não obtendo resultados satisfatórios nos testes realizados.

REFERÊNCIAS

- ABAL. **Reciclagem**. 2016. Disponível em: <<https://goo.gl/9VVhJw>>. Acesso em: 12 out. 2016.
- ABIFA. Rio Claro - Sp: **Associação Brasileira de Fundição**, jun. 2016. Mensal.
- ALUMINIO. 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.
- ARAÚJO, S. A.; ARENALES, M. N. **Dimensionamento de lotes e programação do forno numa fundição automatizada de porte médio**. Pesquisa Operacional, [s.l.], v. 23, n. 3, p.1-22, dez. 2003. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0101-74382003000300002>.
- BETHELL, L. **História da América Latina**. Vol. V: de 1870 a 1930. 161 Trad. de Geraldo Gerson de Souza. São Paulo: Edusp; Imprensa Oficial SP; Brasília, DF: Funag, 2002.
- BUZIN, P. J. W. K. **Desenvolvimento de Briquetes Autorredutores**. 2009. 138 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais - Ppgem, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- BRAGA, R. S. **Marketing de produtos industriais: Um Enfoque Para o Mercado de fundição**. Atlas. São Paulo, 1992.
- CANDIDO, M. **Análise do forno elétrico a arco com uma carga especial**. 2009. 44 f. Tese. Programa de Pós-Graduação, Universidade São Paulo, São Paulo, 2009.
- CASOTTI, B. P.; BEL FILHO, E. **Indústria de fundição: situação atual e perspectivas**. Bndes, Rio de Janeiro, v. 13, n. 33, p.121-162, mar. 2011.
- CÔRTE, J. M. M. **Desenvolvimento de um Forno para Fusão em Cadinho Frio e Vazamento em Contra Gravidade**. 2011. 221 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 4ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1979, p. 19.
- FAGUNDES, A. B. **Mapeamento do gerenciamento das areias verdes de fundição do Estado do Paraná sob a ótica da Produção Mais Limpa: Uma Contribuição Para o Estabelecimento das Estratégias**. 2010. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Gestão Industrial da Gerência de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus Ponta Grossa, Paraná, 2010.

FERNANDES, D. L.; SOUSA, S. M. **Guia de boas práticas do setor fundição**. Disponível em: < <https://goo.gl/UibgZr> >. Acesso em: 25 set. 2016.

FILHO, J. M. **Instalações elétricas industriais**. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ, Editora LTC, 1989, p.362-391.

GABOARDI, G. G.; VERRAN, G. O. **Reciclagem de latas de alumínio usando fusão em forno elétrico à indução**. Estudos Tecnológicos, Joinville, Sc, v. 3, n. 101-11, p.1-11, jun. 2007.

GAGO, M. V. S.; GARDEL, R. S. **Processos de fabricação**. 2010. 23 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Salgado de Oliveira, Niterói, 2010.

GOMES, B. L.; CARLOS, L. O **Processo de fusão e Vazamento do metal no Forno Cubilô**. 2013. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Técnico em Metalurgia, Meta Escola Técnica de Formação Profissional, Belo Horizonte, 2013.

GOMES, M. **Fornos elétricos Industriais**. 2013. Disponível em: < <https://goo.gl/TxPEhx> >. Acesso em: 11 set. 2016.

JUVENIL, E. **Forno de resistência**. Disponível em: < <https://goo.gl/NoJWk3> >. Acesso em: 14 jun. 2016.

LAYARGUES, P. **O cinismo da reciclagem**: o significado ideológico da reciclagem da lata de alumínio e suas implicações para a educação ambiental. LOUREIRO, F.; LAYARGUES, P.; CASTRO, R.(Orgs.) Educação ambiental: repensando o espaço da cidadania. São Paulo: Cortez, 2002, 179-220.

LEME, R. M. **Características dos fornos a indução com conversores IGBTs**. 2011. 46 f. TCC. Programa de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade São Francisco, Itatiba, 2011.

MATTIELO, J. **Estudo das causas da variabilidade dos teores de FeO da escória de um forno elétrico a arco**. 2011. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MEDEIROS, G. A. **Avaliação dos aspectos e impactos ambientais de uma indústria de fundição na região metropolitana de campinas**. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 3., 2012. Goiânia: Ibeas, 2012. p. 1 - 17.

OLIVEIRA, R. J. **A aplicação da tecnologia de simulação numérica e a competitividade das indústrias de fundição de metais do brasil**: um estudo exploratório. 2015. 119 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2015.

OLIVEIRA, B. F. **Fundição**. 2013. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Campus Belém; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria; Rede e-Tec Brasil, 2013.

REGAGNIN, F. A. **Flutuações de tensão causada pelos fornos a arco**: efeitos e possíveis mitigações. 2012. 49 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade São Francisco, Itatiba, 2012.

Relatório de sustentabilidade da indústria do alumínio 2006/2007. São Paulo: Abal, 2007.

RIBEIRO, R.A.C. **Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de resíduos industriais metal – mecânicos**. Dissertação – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

RIBEIRO, J. F. A. **Sustentabilidade dos Produtos de Construção**: aplicação da análise do ciclo de vida a um perfil de alumínio. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

SOARES, G. Al. **Fundição**: Mercado, Processos e Metalurgia. 2000. Disponível em: <<https://goo.gl/qyN7Gt>>. Acesso em: 08 out. 2016.

SILVA, B.; VINICIUS, B. **Materiais Refratários**. Salvador - Ba: Vídeo, 2014. Color. Disponível em: < <https://goo.gl/M6zBbJ> >. Acesso em: 05 out. 2016.

TAKATA, J. T. **Análise do mercado de fundição dos metais ferrosos no Brasil**. 2002. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Administração de Empresas, Escola de Administração de Empresas de São Paulo, São Paulo, 2002.

ANEXOS