

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO PAULO ALVES DE RAMOS

**PROJETO DE UM QUEIMADOR PARA FORNO DE CADINHO UTILIZANDO GÁS
LIQUEFEITO DE PETRÓLEO (GLP)**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO
2017

JOÃO PAULO ALVES DE RAMOS

**PROJETO DE UM QUEIMADOR PARA FORNO DE CADINHO UTILIZANDO GÁS
LIQUEFEITO DE PETRÓLEO (GLP)**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica - DAMEC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Marcio Tadayuki Nakaura

PATO BRANCO

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

PROJETO DE UM QUEIMADOR PARA FORNO DE CADINHO UTILIZANDO GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO (GLP)

JOÃO PAULO ALVES DE RAMOS

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 09/06/2017 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Adelino Carlos Maccarini
(UTFPR - Depto. de Engenharia Mecânica)

Prof. Me. Paulo Cezar Adamczuk
(UTFPR - Depto. de Engenharia Mecânica)

Prof. Marcio Tadayuki Nakaura
(UTFPR - Depto. de Engenharia Mecânica)
Orientador

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

Aos meus queridos pais e amados irmãos.

Agradecimentos

É difícil agradecer cada uma das pessoas individualmente que de algum modo, nos momentos serenos e também nos apreensivos, fizeram ou fazem parte da minha vida. Assim, para não correr o risco de esquecer de alguém, faço de coração o meu agradecimento global a todos.

Agradeço a Deus que sempre se fez presente em minha caminhada e sem Ele, não teria forças para essa longa jornada.

Aos meus pais, irmãos e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Aos meus sobrinhos e cunhado que se fizeram presente, incentivando e apoiando ao longo deste percurso.

Agradeço também a todos os professores que me acompanharam durante a graduação, em especial ao Prof. Marcio Tadayuki Nakaura responsável pela orientação deste trabalho.

A todos os meus amigos e colegas, pelo incentivo e pelo apoio constante durante este trajeto.

A esta Universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje visualizo um horizonte mais promissor.

*"It matters not how strait the gate,
How charged with punishments the scroll,
I am the master of my fate:
I am the captain of my soul."*

(William Ernest Henley, 1875)

Resumo

RAMOS, João Paulo Alves. Projeto de um queimador para forno de cadinho utilizando gás liquefeito de petróleo (GLP). 2017. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

A fundição de alumínio quando em pequena escala, é muito utilizada em fornos de cadinho, os quais têm sua fonte de calor fornecida por um queimador. Com base nas dimensões de um cadinho existente na universidade, foi dimensionado o forno de cadinho e projetado o seu queimador. O estudo feito mostra que a energia térmica necessária para fusão do alumínio no forno de cadinho é aproximadamente $1,28 \text{ kJ}$, utilizando o gás liquefeito de petróleo (GLP). O tempo necessário para fundir $1,7 \text{ kg}$ de alumínio, partindo da temperatura ambiente, é cerca de dez minutos. As dimensões do queimador e do forno podem ser observadas nos Apêndices deste trabalho.

Palavras-chave: Fundição, Alumínio, Forno, Cadinho, Queimador.

Abstract

RAMOS, João Paulo Alves. Design of burner for crucible furnace using liquefied petroleum gas (GLP). 2017. 62 f. Course Completion Work - Mechanical Engineering Course, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2017.

When the production of aluminum smelting is on small scale is very common to use crucible furnaces, which have their source of heat supplied by a burner. With the dimensions of a crucible of the university, furnace was dimensioned and projected the burner. The study showed that using the liquefied petroleum gas (GLP), the thermal energy to aluminum smelting is approximately 1.28 kJ . The time required to melt 1.7 kg of aluminum, starting at ambient temperature, is about ten minutes. The dimensions of the burner and furnace can be observed in the Appendices in this work.

Keywords: Smelting, Aluminum, Furnace, Crucible, Burner.

Lista de ilustrações

| | | |
|----------|---|----|
| Figura 1 | Condutividade térmica de refratários | 24 |
| Figura 2 | Maneira correta de utilização da tenaz | 29 |
| Figura 3 | Posicionamento do cadinho no interior da câmara | 30 |
| Figura 4 | Principais componentes de um queimador | 31 |
| Figura 5 | Parâmetros de projeto para determinar dimensões do tubo Venturi | 32 |
| Figura 6 | Modelo do cadinho - linha carbetto de silício | 35 |
| Figura 7 | Dimensões do forno | 36 |
| Figura 8 | Dimensões tubo Venturi | 45 |

Lista de tabelas

| | | |
|----------|--|----|
| Tabela 1 | Composição típica das classes de cadinho | 21 |
| Tabela 2 | Propriedades físicas típicas do alumínio | 28 |
| Tabela 3 | Dimensões da câmara entre o cadinho e a parede do refratário . . . | 30 |
| Tabela 4 | Dimensões dos cadinhos da linha carbetto de silício | 35 |
| Tabela 5 | Massas atômicas de elementos químicos participantes de reações de combustão | 39 |
| Tabela 6 | Variáveis para cálculo da equação de d_g | 43 |

Sumário

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução | 19 |
| 1.1 | Objetivos | 20 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 20 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 20 |
| 2 | Referencial Teórico | 21 |
| 2.1 | Cadinho | 21 |
| 2.2 | Conservação de massa | 22 |
| 2.3 | Refratários | 22 |
| 2.3.1 | Curvas típicas de condutividade térmica de refratários | 24 |
| 2.4 | Gás liquefeito de petróleo - GLP | 24 |
| 2.5 | Transferência de calor | 25 |
| 2.5.1 | Transferência de calor por condução | 25 |
| 2.5.2 | Transferência de calor por convecção | 26 |
| 2.5.3 | Transferência de calor por radiação | 26 |
| 2.6 | Lei dos gases ideais | 26 |
| 2.7 | Alumínio | 27 |
| 3 | Metodologia | 29 |
| 3.1 | Tenaz | 29 |
| 3.2 | Cuidados e dimensionamento de fornos a óleo ou a gás | 29 |
| 3.3 | Parâmetros característicos de um queimador atmosférico | 31 |
| 3.4 | Potência térmica | 31 |
| 3.5 | Dimensionamento de queimadores atmosféricos | 31 |
| 3.5.1 | Determinação do diâmetro da garganta do Venturi | 32 |
| 3.5.2 | Afastamento do bico injetor à garganta do venturi | 33 |
| 3.5.3 | Comprimento do difusor | 33 |
| 3.5.4 | Comprimento do bocal de entrada | 33 |
| 3.5.5 | Diâmetro do bocal de entrada | 33 |
| 3.5.6 | Diâmetro de expansão do difusor | 33 |
| 4 | Desenvolvimento do projeto de um forno cadinho e queimador atmosférico | 35 |
| 4.1 | Dimensionamento do forno cadinho | 35 |
| 4.2 | Transferência de calor do forno | 36 |
| 4.2.1 | Área de transferência do forno | 36 |

| | | |
|-------------------|---|-----------|
| 4.2.2 | Transferência de calor do forno por condução | 37 |
| 4.2.3 | Energia térmica necessária para fusão do alumínio | 37 |
| 4.2.4 | Energia térmica necessária para aquecimento do cadinho . . . | 38 |
| 4.3 | Estequiometria da combustão | 38 |
| 4.3.1 | Balanço de massa (ar/combustível) | 39 |
| 4.3.2 | Quantidade de CO_2 gerada pela combustão | 42 |
| 4.4 | Dimensões e parâmetros da geometria do Venturi | 43 |
| 4.5 | Cálculo da potência térmica do queimador | 45 |
| 5 | Resultados e Conclusões | 47 |
| | Referências | 49 |
| APÊNDICE A | Detalhamento do forno cadinho e seus componentes | 51 |
| APÊNDICE B | Pinça utilizada na remoção do cadinho do interior do forno | 57 |

1 Introdução

A indústria metalúrgica é um dos principais setores da economia do país, utiliza de vários tipos de combustíveis para o processo de fundição, onde os principais fornos para fusão de metais são: forno elétrico de indução, forno elétrico a arco, forno a cadinho e o forno cubilô. Cada um destes fornos tem uma específica aplicabilidade na indústria. Essa aplicabilidade depende da escala de produção e do controle metalúrgico do processo.

Conforme Pereira et al. (2005), fundição é um processo de fabricação em que um metal fundido é vazado na cavidade de um molde projetado com o formato desejado. As ligas não ferrosas (alumínio, cobre, etc.) fundidas, usualmente utilizam fornos com aquecimento a óleo (bpf ou diesel), e gás liquefeito de petróleo (GLP) para o processo de fusão. Deve-se ao fato de que os pontos de fusão destas ligas são baixos e os custos operacionais e de manutenção são atrativos.

Forno de cadinho são utilizados em pequenos empreendimentos, por exemplo em laboratórios, com propósito de fundir ligas não ferrosas de baixo ponto de fusão como: chumbo, alumínio, bronze, etc. Caracterizam-se por serem construídos em forma cilíndricas e revestidos. Para fusão em pequena escala, é uma das melhores soluções e mais economicamente viável. 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 (OLIVEIRA, 2013).

O forno de cadinho necessita de um queimador bem dimensionado. Segundo Vlassov (2001), o queimador é um equipamento responsável de processar a queima de uma mistura ar/combustível numa câmara de combustão. O combustível, seja ele sólido, líquido ou gasoso, somente apresenta uma boa combustão se forem criadas condições necessárias e adequadas. Para construção desse equipamento leva-se em conta vários fatores, tais como: consumo, pressões disponíveis para o combustível, pressão do ar na entrada do queimador, das temperaturas empregadas, entre outros.

A partir da seleção e dimensionamento do forno foi realizado o estudo das perdas por transferência de calor provenientes do mesmo, como também a análise estequiométrica, para o dimensionamento do queimador que tenha condições de fornecer uma potência térmica com capacidade de suprir as perdas e também garantir a fusão do alumínio.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver o projeto de um forno de cadinho e seu queimador a gás liquefeito de petróleo, para fusão de alumínio com possível utilização didática na UTFPR – PB (Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Pato Branco). Como o cadinho já se encontra disponível na Universidade, a partir de suas dimensões é possível dimensionar o forno, conseqüentemente a partir do forno já especificado calcula-se as perdas de carga térmica subseqüentes do processo, com as perdas já calculadas e tendo a potência necessária para fundição do alumínio, pode-se então dimensionar o queimador para melhor eficiência no processo. Assim sendo, o projeto envolve as especificações de materiais adequados para o forno, como dos refratários a serem utilizados, como a tenaz utilizada no processo para manuseio do cadinho, como também materiais para possível fabricação de todo o conjunto.

A importância do presente projeto está vinculada aos interesses acadêmicos do Curso de Engenharia Mecânica da UTFPR - PB, uma vez que o forno pode produzir peças fundidas para estudos dos acadêmicos da Universidade, proporcionando um aprendizado no sentido prático das disciplinas correlacionadas com o assunto em questão.

1.1.2 Objetivos específicos

- Buscou-se referências bibliográficas para embasamento teórico no dimensionamento do queimador;
- Dimensionou-se o forno de cadinho baseado nas dimensões pré determinadas;
- Calculou-se as perdas de carga térmicas;
- Projetou-se um queimador com uma eficiência considerável, possibilitando a fundição do alumínio.

2 Referencial Teórico

2.1 Cadinho

Cadinho é um recipiente com características refratárias, resistente a temperaturas elevadas, no qual são fundidos materiais a altas temperaturas.

De acordo com Duarte (2008), a finalidade do cadinho é, por meio de uma fonte de energia, transferir calor para fundir os metais e mantê-los em fusão até seu vazamento. Quanto melhor for a sua condução de calor, mais eficiente será seu desempenho. Condução e irradiação são as duas formas principais de transferência de calor. As propriedades desejáveis de um cadinho são:

1. Boa condutividade térmica;
2. Refratariedade;
3. Resistência ao choque térmico;
4. Resistência a oxidação;
5. Resistência química;
6. Resistência mecânica;
7. Forma física.

Ainda, Duarte (2008) classifica os cadinhos de três formas básicas e a Tabela 1 apresenta a composição típica de cada um.

1. Carbetto de silício ligado a carbono – *SiC*;
2. Grafite ligado a carbono – *GF*;
3. Grafite – argila – *GA*.

Tabela 1 - Composição típica das classes de cadinho

| Tipos | Composição típica aproximada |
|--------------------------------------|--|
| Grafite – Argila | 35% de grafite |
| Grafite ligado a Carbono | 35% de grafite, 12% de carbetto de silício |
| Carbetto de Silício ligado a Carbono | 30% de grafite, 45% de carbetto de silício |

Fonte : Duarte (2008).

2.2 Conservação de massa

Segundo Incropera et al. (2007), uma das leis de conservação concernente a um escoamento de um fluido viscoso é que a matéria não pode ser criada e nem destruída, ou seja, a massa total de um sistema permanece inalterada quando a reação ocorre em um sistema fechado, sendo assim, a relação da massa de entrada tem que ser igual à da massa de saída, ou melhor, em um sistema fechado a massa total permanece constante. Assim, para escoamento em regime permanente, bidimensional, num volume de controle diferencial, tem-se:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

onde u e v são componentes nas direções x e y da velocidade. A Equação 2.1, conhecida também como equação da continuidade, é uma expressão geral da conservação de massa global, a qual deve ser válida em todos os pontos do fluido. A equação se aplica a um fluido de uma única espécie e também pode ser aplicado a fluidos que estejam ocorrendo difusão de espécies e reações químicas, desde que o fluido possa ser aproximado como incompressível, ou seja, com densidade constante (INCROPERA et al., 2007).

2.3 Refratários

Os materiais refratários englobam uma vasta gama de compostos, usualmente óxidos ou mistura de óxidos, como também outras substâncias como: carbono, carbetos, nitretos, boretos, etc. As propriedades dos refratários a elevadas temperaturas são superiores a outros materiais, tais como: elevado ponto de fusão, boa refratariedade, resistência à corrosão em meios agressivos, resistência mecânica, resistência as variações térmicas, estabilidade estrutural, entre outras (MOURÃO, 2007).

Segundo Mourão (2007), dentre as propriedades dos materiais refratários a principal é a sua capacidade de ser aplicado a altas temperaturas superiores a 1580°C . Eles podem ser classificados de várias formas, em função de sua composição química, densidade, fase termodinâmica majoritária, modo de aplicação, máxima temperatura de serviço, sistema ligante, sistema de aplicação, teor de cimento ($\%CaO$) dentre outras.

Conforme a fabricante Ibar (2016), os refratários podem ser classificados quimicamente em cinco categorias distintas: silicosos, sílico-aluminosos, aluminosos, básicos e especiais.

1. **Silicosos:** produtos densos, prensados e queimados. Obtém teores de SiO_2 entre 65 a 97%. A principal matéria-prima é uma fonte de sílica de alta pureza.

Aplicados a altas temperaturas superiores a 600°C , com propriedades de alta resistência à deformação e estabilidade térmica.

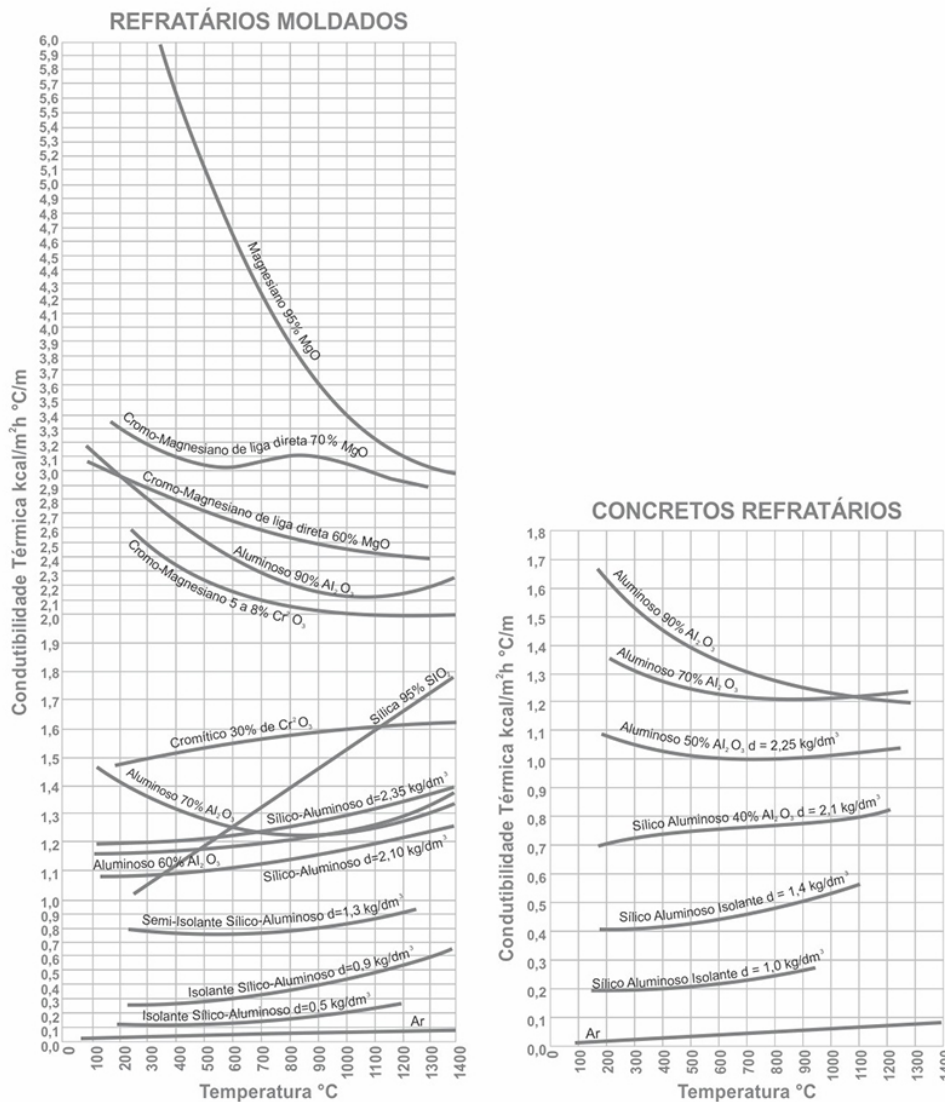
2. **Sílico - Aluminosos**: do mesmo modo dos silicosos são produtos densos, prensados e queimados a altas temperaturas, com teores de Alumina entre 22% a 46%. Contém baixos teores de óxido de ferro e álcalis. Propriedades finais dependem acima de tudo, da qualidade da matéria-prima, do processo de mistura, da prensagem e da condição de queima. Utilizados principalmente nas indústrias de alumínio e não ferrosos.
3. **Aluminosos**: são prensados e queimados a alta temperatura abrangendo teores de Alumina entre 46% a 99%. Produzidos a partir de agregados aluminosos sinterizados, alumina fundida e alumina sinterizada de alta pureza química. Dentre os aluminosos podem ser divididos nos seguintes grupos:
 - a) Aluminosos Resinados: produtos resinados, contendo principalmente óxido de alumínio, carbeto de silício e grafite. Também podem conter diferentes teores de grafite e carbeto de silício, os quais são curados em temperatura próxima a 200°C ;
 - b) Alumina - Cromo: prensados e queimados a alta temperatura, compreendendo agregados aluminosos e diferentes teores de óxido de cromo. Possuem alta resistência à corrosão por escórias e alta resistência mecânica;
 - c) Alumina - Carbono: prensados e queimados a alta temperatura sob atmosfera redutora, a base de agregados de alta alumina e grafite. Com elevada resistência a choque térmico e alta corrosão por escórias;
 - d) Aluminosos Especiais: produtos prensados e queimados que contêm combinações de agregados de alta alumina com zirconita, mulita, carbeto de silício e espinélios.
4. **Básicos**: podem ser,
 - a) Magnésia – Carbono: evidenciado pelo uso de óxido de magnésio de alta pureza, grafite e ligados por resinas fenólicas. Também contém aditivos especiais para aumentar sua resistência à oxidação durante o uso. Com excelentes propriedades de resistências ao choque térmico e à corrosão em altas temperaturas;
 - b) Magnésia - Cromita: com teores de MgO entre 55 a 81%, os quais são produzidos a partir da mistura de óxido de magnésio e cromita. São densos, prensados e queimados a temperaturas superiores a 1550°C ;

- c) Magnesianos: produtos produzidos principalmente por compostos de óxido de magnésio com diferentes purezas químicas, densos, prensados e queimados em altas temperaturas, nos quais os teores de MgO variam entre 81 a 98%;
- d) Magnésia - espinélio: produtos básicos contendo espinélio ($MgO - Al_2O_3$) prensados e queimados em temperaturas superiores à $1550^\circ C$.

5. Especiais: conforme a necessidade.

2.3.1 Curvas típicas de condutividade térmica de refratários

Figura 1- Condutividade térmica de refratários



Fonte : Ibar (2016).

2.4 Gás liquefeito de petróleo - GLP

Pode ser definido como gás liquefeito do petróleo, GLP, 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. Os principais constituintes do GLP são: propano (C_3H_8); propeno (C_3H_6); isobutano (C_4H_{10}); n-butano (C_4H_{10}); e buteno (C_4H_8). O poder calorífico do propano é de $49\,952\text{ kJ/kg}$ ($11\,934\text{ kcal/kg}$), a do butano de $49\,255\text{ kJ/kg}$ ($11\,767\text{ kcal/kg}$) e o da gasolina de $40\,660\text{ kJ/kg}$ ($9\,714\text{ kcal/kg}$). 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 47.500 kJ/kg , assim como seu *PCI* 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 ervas daninhas, aquecimento e esterilização de ambiente de criação de animais.

2.5 Transferência de calor

Segundo Holman (1999), pode ser definida como a ciência que visa prever a transferência de energia que pode ocorrer entre corpos materiais, a partir de uma diferença de temperaturas.

A seguir, é apresentado os três mecanismos básicos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.

2.5.1 Transferência de calor por condução

Conforme Holman (1999), quando existe uma diferença de temperatura de um corpo para outro, então há uma transferência de energia da região de alta temperatura

para a de baixa temperatura. Assim, é dito que a energia é transferida por condução, e a velocidade de transferência de energia por unidade de área é proporcional ao gradiente normal de temperatura.

Segundo Bejan e Kraus (2003), condução em uma única dimensão de difusão térmica através dos sólidos, é regida pela lei de Fourier, dada como:

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

Onde q é a taxa de transferência de calor e dT/dx é o gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor. A constante k é chamada de condutividade térmica do material e A é a área da seção transversal. É importante salientar que a Equação 2.2, é a igualdade que define a condutividade térmica, e um sistema de unidades típico do fluxo de calor é expressa em watts (HOLMAN, 1999).

2.5.2 Transferência de calor por convecção

Segundo Bejan e Kraus (2003), o transporte térmico convectivo de uma superfície para um fluido em movimento pode ser relacionado com um coeficiente de transferência de calor h , com a área da superfície “molhada” S , e com a diferença de temperatura da superfície-fluido na forma:

$$q = hS(T_s - T_f) \quad (2.3)$$

2.5.3 Transferência de calor por radiação

Diferente dos mecanismos de condução e convecção, onde os meios de transferência são meios materiais, o calor pode também ser transferidos para as regiões onde existe um vácuo perfeito. Assim sendo, o mecanismo está sob radiação eletromagnética. Considerando um radiador ideal, ou corpo negro, esse libera energia a uma taxa proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo (HOLMAN, 1999). Assim,

$$q = \sigma A(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.4)$$

Onde σ , é a constante de proporcionalidade de Stefan-Boltzmann com valor de $5,669 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$.

2.6 Lei dos gases ideais

Segundo as leis de Boyle, de Charles e de Avogadro, tendo que, o volume de um gás depende da pressão, da temperatura e do número de mols, como segue:

Lei de Boyle (T e n constantes)

$$V \propto \frac{1}{P} \quad (2.5)$$

Lei de Charles (P e n constantes)

$$V \propto T \quad (2.6)$$

Lei de Avogadro (T e P constantes)

$$V \propto n \quad (2.7)$$

Assim, o volume V deve ser proporcional ao produto desses três termos, isto é:

$$V \propto \frac{nT}{P} \quad (2.8)$$

A proporcionalidade por ser substituída por uma igualdade acrescentando uma constante de proporcionalidade, R , assim temos:

$$V = R \frac{nT}{P} \quad (2.9)$$

ou

$$PV = RnT \quad (2.10)$$

Onde P é a pressão absoluta, V é o volume, n é o número de mols, R é a constante universal dos gases e T é a temperatura absoluta (CHANG, 2008).

2.7 Alumínio

Devido combinação de propriedades, faz do alumínio um dos mais versáteis materiais utilizados na engenharia, arquitetura e indústria em geral, permitindo que ele

tenha uma diversa gama de aplicações. Dos produtos que utilizam o alumínio ganham competitividade, em função dos inúmeros atributos que este metal fornece, tais como, baixa densidade, elevada condução térmica e elétrica, alta relação resistência/peso, dentre outras (ABAL, 2016).

Segundo a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL, 2016), a Tabela 2 compara as características do alumínio com outras duas famílias de metais:

Tabela 2 - Propriedades físicas típicas do alumínio

| Propriedades físicas típicas | Alumínio | Aço | Cobre |
|--|-----------------|------------|--------------|
| Densidade (g/cm^3) | 2,70 | 7,86 | 8,96 |
| Temperatura de fusão ($^{\circ}C$) | 660 | 1 500 | 1 083 |
| Módulo de elasticidade (MPa) | 70 000 | 205 000 | 110 000 |
| Coeficiente de dilatação térmica ($L/^{\circ}C$) | 23.10-6 | 11,7.10-6 | 16,5.10-6 |
| Condutibilidade térmica a $25^{\circ}C$ ($Cal/cm/^{\circ}C$) | 0,53 | 0,12 | 0,94 |
| Condutibilidade elétrica (% IACS) | 61 | 14,5 | 100 |

Fonte : ABAL (2016).

3 Metodologia

Nesta etapa é apresentado o método que foi utilizados no estudo e dimensionamento do forno cadinho, do queimador e demais equipamentos utilizados no processo.

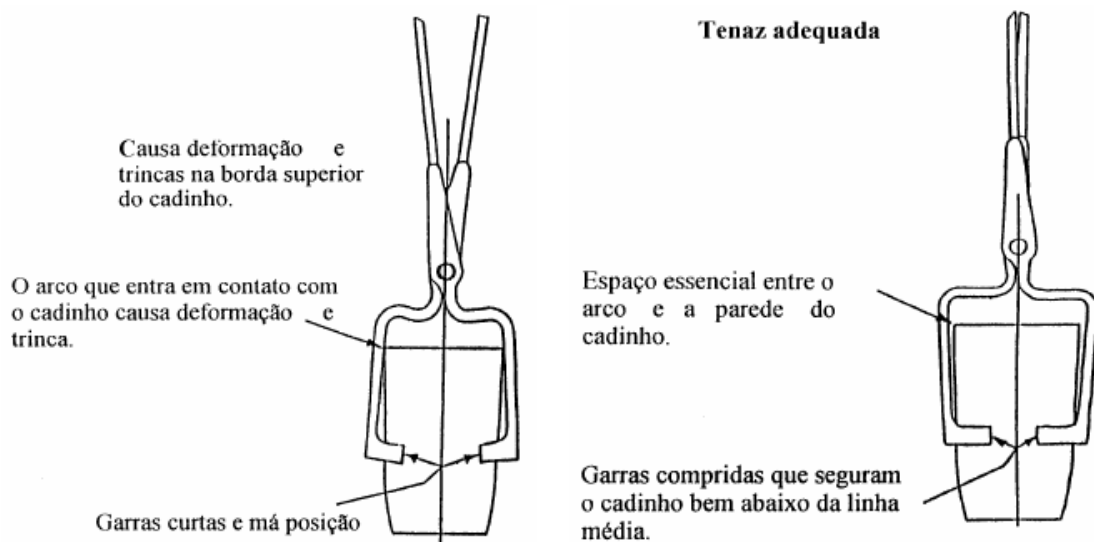
3.1 Tenaz

Conforme orientações de Duarte (2008), para melhor manuseio do cadinho é utilizado uma tenaz, facilitando assim o trabalho do operador.

Para melhor eficiência da tenaz, deve-se prender no terço inferior do cadinho, onde as garras devem se prender de forma similar a circunferência do cadinho. Também podem ser utilizadas para manusear os cadinhos vazios, porém deve-se evitar utilizar as mesmas para pegar o cadinho pela borda, pois poderá resultar em quebras, especialmente se as paredes já estiverem comprometidas.

A Figura 2, mostra uma exemplificação da maneira correta de utilização das tenazes.

Figura 2 - Maneira correta de utilização da tenaz



Fonte : Duarte (2008).

3.2 Cuidados e dimensionamento de fornos a óleo ou a gás

Segundo Duarte (2008), para melhor eficiência da chama do queimador, deve-se centralizar o suporte central do fundo do forno com o centro do cadinho, facilitando

o manuseio. Estipula-se que o diâmetro do suporte seja o mesmo que o do fundo do cadinho. Para um espaçamento adequado utiliza-se entre a parede externa e interna do forno em torno de 70 mm no mínimo, de acordo com a capacidade do cadinho.

Na Tabela 3 são mostrados as dimensões da câmara entre o cadinho e a parede do refratário.

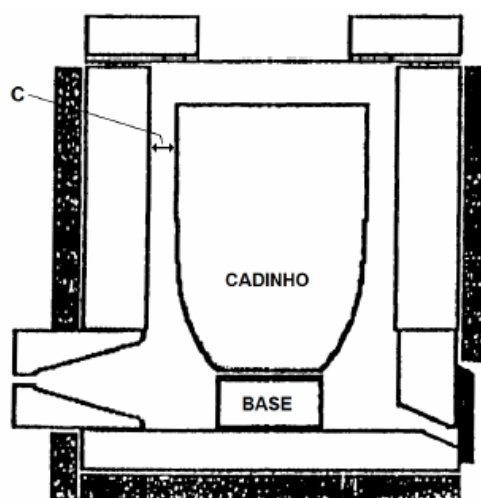
Tabela 3 - Dimensões da câmara entre o cadinho e a parede do refratário

| Tipo de cadinho | Câmara (C) (mm) | | | Topo (mm) |
|-----------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| | Lift-out | Bale-out | Tilting | |
| A I - A 50 | 80 | 60 - 70 | - | 50 |
| A 60 - A 150 | 100 - 120 | 70 - 80 | - | 80 |
| A 200 - A 600 | - | 80 - 100 | - | 100 |
| A 1000 | - | 120 | - | 100 |
| B 135 - B 175 | - | 80 - 100 | - | 100 |
| B 250 - B 330 | - | 100 | - | 100 |
| B 400 - B 600 | - | 120 - 120 | - | 100 |
| TPC (Todos) | - | - | 80 - 100 | 100 |
| TBC 135 - 175 | - | - | 80 - 100 | 100 |
| TBC 250- 350 | - | - | 100 | 100 |
| TBC 300/400/600 | - | - | 100 - 120 | 100 |

Fonte : Duarte (2008).

A Figura 3 mostra a posição do cadinho no interior da câmara a uma distância “c” da parede.

Figura 3 - Posicionamento do cadinho no interior da câmara

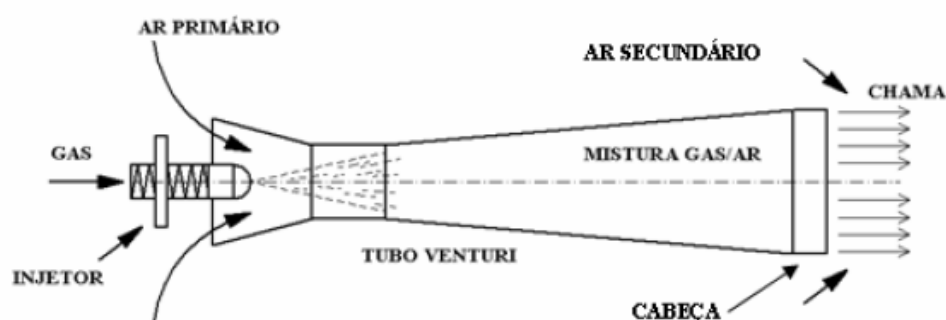


Fonte : Duarte (2008).

3.3 Parâmetros característicos de um queimador atmosférico

Dentre as principais características de projeto de um queimador atmosférico, estão a potência térmica e a quantidade de ar teórico arrastado. Como o objetivo é projetar um queimador adequado ao forno, tem-se que o ar arrastado deve ser o mesmo necessário na estequiometria. Pode-se analisar esses conceitos a seguir.

Figura 4 - Principais componentes de um queimador



Fonte : Ibañez (2005).

3.4 Potência térmica

Segundo Ibañez (2005), é definida como o produto da vazão de gás combustível e seu poder calorífico inferior (PCI). Onde a vazão de gás combustível que passa através de um orifício é expressa como:

$$\dot{m} = \rho A_i u_f \quad (3.1)$$

onde ρ é a densidade do gás combustível, A_i é a área do injetor de gás e u_f é a velocidade do gás na saída do bico injetor. Assim, tem-se a potência térmica do queimador, como:

$$\dot{Q}_t = \dot{m}_{real} PCI \quad (3.2)$$

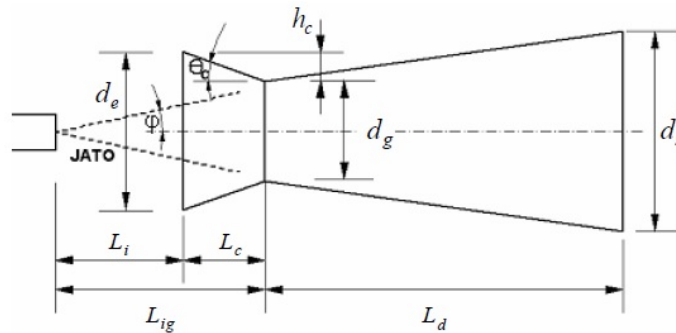
Onde, PCI é o poder calorífico inferior e \dot{m}_{real} é considerada neste caso como \dot{m}_{ideal} .

3.5 Dimensionamento de queimadores atmosféricos

Nesta sessão mostra o procedimento utilizado para o dimensionamento do queimador atmosférico, onde o equacionamento foi deduzido teoricamente e testadas

experimentalmente por Ibañez (2005). A seguir observa-se a relação das dimensões a serem calculadas.

Figura 5 - Parâmetros de projeto para determinar dimensões do tubo Venturi



Fonte : Ibañez (2005).

3.5.1 Determinação do diâmetro da garganta do Venturi

A partir de análises feitas por Ibañez (2005), onde os valores de aeração primária das equações, comparados com os valores de simulação numérica, existe cerca de 30% a 38% de diferença nos resultados obtidos pelas equações. Como uma aproximação, pode-se definir o d_g sendo:

$$R = 1,3 \frac{\rho_f}{\rho_a} \left[\frac{d_g}{d_i} \left(\frac{\rho_m}{\rho_f} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (3.3)$$

onde,

ρ_f : densidade do combustível;

ρ_a : densidade do ar;

d_g : diâmetro da garganta;

d_i : diâmetro do injetor;

ρ_m : densidade da mistura;

R : relação volumétrica de ar e combustível;

e

$$R = 4,76 n A \quad (3.4)$$

Sendo A a quantidade de ar teórico do sistema e n o parâmetro de aeração.

3.5.2 Afastamento do bico injetor à garganta do venturi

A distância que o bico injetor deve ficar da garganta do venturi, pode ser determinada por,

$$L_{ig} = 0,97 d_g + 42 \quad (3.5)$$

onde L_{ig} é dada como a distância do injetor até a garganta do tubo de Venturi em *mm*.

3.5.3 Comprimento do difusor

O comprimento do difusor, L_d , tem influência direta sobre o arrasto do ar. Para resultados aceitáveis, Ibañez (2005) recomenda que o comprimento do difusor deve manter uma relação com o diâmetro da garganta, d_g , do tubo de Venturi, entre a seguinte faixa de valores:

$$L_d = [4 \leftrightarrow 7] d_g \quad (3.6)$$

3.5.4 Comprimento do bocal de entrada

Pode-se admitir um valor estimado para o comprimento do bocal de entrada L_c , de 20% a 30% de L_{ig} (IBÁÑEZ, 2005), assim temos:

$$L_c = [0,2 \leftrightarrow 0,3] L_{ig} \quad (3.7)$$

3.5.5 Diâmetro do bocal de entrada

De acordo com Ibañez (2005), a seção convergente α_c deve ter um ângulo em torno de 14° a 20°.

$$d_e = 2 L_c \tan(\alpha_c) + d_g \quad (3.8)$$

3.5.6 Diâmetro de expansão do difusor

A seção divergente α_d deve ter um ângulo em torno de 3° a 5°, segundo Ibañez (2005), e o diâmetro pode ser determinado por:

$$d_{exp} = 2 L_d \tan(\alpha_d) + d_g \quad (3.9)$$

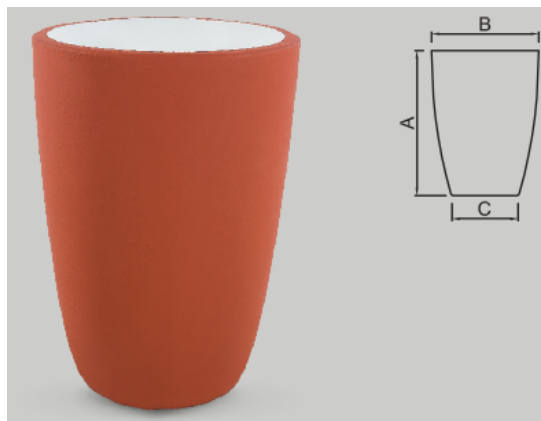
4 Desenvolvimento do projeto de um forno cadinho e queimador atmosférico

Neste capítulo é apresentado o método utilizado para projetar o forno e o queimador com base em geometria em tubo Venturi. Onde, por meio de equações já apresentadas e também das variáveis definidas, é possível dimensionar o forno e o queimador atmosférico. Para o diâmetro do injetor, foi selecionado um comercial de $d_i = 0,85 \text{ mm}$.

4.1 Dimensionamento do forno cadinho

Com base nos estudos apresentados por Duarte (2008), na parte de dimensionamento de fornos cadinho, utilizando as medidas do cadinho (disponível na UTFPR), as quais são apresentadas a seguir, pode-se então determinar as medidas adequadas para o dimensionamento do forno. Para melhor entendimento das dimensões adotadas, no Apêndice A pode ser feita uma melhor análise dos desenhos do forno.

Figura 6 - Modelo do cadinho - linha carbeto de silício



Fonte : Corona (2017).

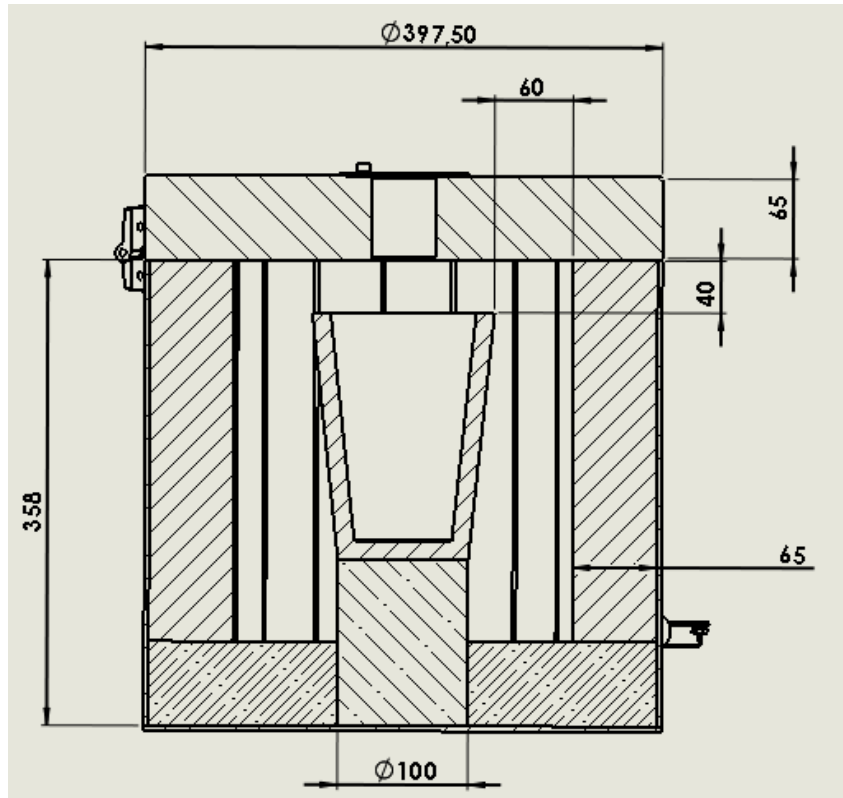
Tabela 4 - Dimensões dos cadinhos da linha carbeto de silício

| TIPO | A (mm) | B (mm) | C (mm) | Aluminio (kg) | Cobre (kg) | C (Litros) |
|------|--------|--------|--------|---------------|------------|------------|
| A/F1 | 95 | 75 | 52 | 0,4 | 1,4 | 0,18 |
| A/F2 | 112 | 98 | 71 | 0,9 | 2,9 | 0,37 |
| A/F3 | 132 | 100 | 71 | 1,1 | 3,7 | 0,47 |
| A/F4 | 140 | 116 | 80 | 1,6 | 5,2 | 0,66 |
| A/F5 | 150 | 118 | 80 | 1,7 | 5,6 | 0,72 |
| A/F6 | 170 | 136 | 95 | 2,6 | 8,5 | 1,08 |

Fonte : Corona (2017).

A partir das dimensões apresentadas na Tabela 4 do cadinho da linha carbetto de silício (tipo A/F5), obtêm-se então, as medidas apropriadas para o forno, as quais são apresentadas a seguir na Figura 7, em corte.

Figura 7 - Dimensões do forno



Fonte : Autoria Própria.

O refratário selecionado foi o refratário silício-aluminoso, o qual é recomendado na utilização de fornos de fundição de metais não ferrosos, e de baixa produção o qual atende perfeitamente este projeto.

4.2 Transferência de calor do forno

Para o estudo da transferência de calor do forno foi considerado a forma de construção e também de instalação, admitindo apenas perdas de calor por condução, desprezando as perdas por irradiação e convecção por serem muito pequenas em relação à de condução.

4.2.1 Área de transferência do forno

A área de transferência de calor por condução do forno é dado por:

$$A_b = \pi r^2 \quad (4.1)$$

e

$$A_t = 2 A_b + 2 \pi r H \quad (4.2)$$

onde A_t é a área total, A_b é a área da base, altura H igual a 293 mm e raio r igual a 130 mm . Obtendo-se então,

$$A_t = 0,292 \text{ m}^2$$

4.2.2 Transferência de calor do forno por condução

A transferência de calor do forno por condução é dado por,

$$\dot{Q}_{P/h} = \frac{K A_t}{L} (T_{s1} - T_{s2}) \quad (4.3)$$

onde K é a condutividade térmica, A_t é a área total do forno, L é a espessura da parede igual a 65 mm , T_{s1} é temperatura da parte interna do forno (676°C), e T_{s2} é a temperatura da parte externa (admitindo 25°C). Considerando $K = 0,23 \text{ kcal} / \text{m}^2 \text{ h}^\circ\text{C} / \text{m}$, temos:

$$\dot{Q}_{P/h} = 281,62 \frac{\text{J}}{\text{h}}$$

4.2.3 Energia térmica necessária para fusão do alumínio

Com base nas propriedades do alumínio pode-se determinar a energia térmica necessária para obter a fusão do alumínio, com a capacidade volumétrica do cadinho, pode-se então considerar $1,7 \text{ kg}$ de alumínio (limite máximo). Logo, a energia necessária para fusão de alumínio pode ser obtida pela equação:

$$Q_f = m c_p \Delta T \quad (4.4)$$

onde Q_f é energia térmica necessária para fusão do alumínio, m é a massa ($1,7 \text{ kg}$), c_p calor específico do alumínio igual a 903 J/kg K , ΔT é a diferença de temperatura de vazamento e temperatura ambiente, onde temperatura ambiente considerada é 25°C e temperatura de vazamento é 676°C . Assim,

$$Q_f = 999,35 J$$

4.2.4 Energia térmica necessária para aquecimento do cadinho

Com base nas propriedades do cadinho pode-se determinar a energia térmica necessária para aquecer o cadinho, têm-se então que a massa do cadinho é igual a $2,2 kg$. Logo, a potência necessária para fusão de alumínio pode ser obtida pela equação:

$$Q_c = m c_p \Delta T \quad (4.5)$$

onde Q_c é energia térmica necessária para aquecimento do cadinho, m é a massa ($2,2 kg$), c_p calor específico da sílica igual a $703 J/kg K$, ΔT é a diferença de temperatura de vazamento e temperatura ambiente, onde temperatura ambiente considerada é $25^\circ C$ e temperatura de vazamento é $676^\circ C$. Assim,

$$Q_c = 1000,7 J$$

4.3 Estequiometria da combustão

Segue a seguir as definições básicas para atmosfera padrão.

- Componentes típicos: N_2 , O_2 , Ar e H_2O ;
- Composição simplificada: 21% de O_2 e 79% de N_2 ;
- Padrões de Atmosfera:
 1. CPTP (condições padrão de temperatura e pressão) $273,15 K$ ($0^\circ C$) e $105 kPa$ ($1bar$).
 2. Condições de referência termodinâmica: $298,15 K$ ($25^\circ C$) e $101325 Pa$.
 3. Para ar seco, tem-se a constante dos gases, $R_d = 287 kJ/kg$.

Tabela 5 - Massas atômicas de elementos químicos participantes de reações de combustão

| Elemento químico | <i>H</i> | <i>C</i> | <i>O</i> | <i>N</i> | <i>S</i> | <i>Fe</i> |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Massa atômica | 1,008 | 12,01 | 16 | 14,007 | 32,06 | 55,84 |

Fonte : Vlassov (2001).

4.3.1 Balanço de massa (ar/combustível)

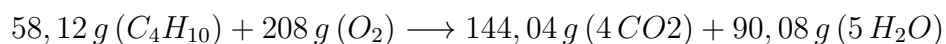
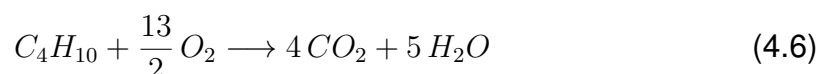
O GLP consiste essencialmente de propano C_3H_8 e butano C_4H_{10} , assim o poder calor calorífico do GLP não varia muito, ficando na faixa dos $47\,500\text{ kJ/kg}$.

Utilizando os dados da Tabela 5, temos:

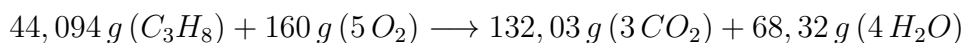
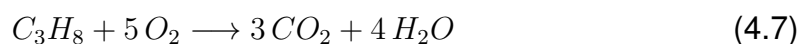
- 1 *kmol* de carbono *C* é igual a 12,01 *kmol/kg*;
- 1 *kmol* de oxigênio molecular O_2 é igual a 32 *kmol/kg*;
- 1 *kmol* de dióxido de carbono CO_2 é igual a 44,01 *kmol/kg*;
- 1 *kmol* de hidrogênio molecular H_2 é igual a 2,016 *kmol/kg*;
- 1 *kmol* de vapor de água H_2O é igual a 18,032 *kmol/kg*.

As reações do butano e propano, temos:

1. Butano:



2. Propano:



Ou seja,

- para queimar 1 *kg* de butano C_4H_{10} é necessário 3,579 *kg* de oxigênio;
- para queimar 1 *kg* de propano C_3H_8 é necessário 3,629 *kg* de oxigênio.

Assim, considerando a composição do GLP como 50% de butano e 50% de propano, tem-se a quantidade de ar necessária para queimar 1 *kg* de GLP.

1. Massa de ar necessária para a queima total do butano:

$$M_{abt} = 1,7895 \text{ kg}$$

2. Massa de ar necessária para queima total do propano:

$$M_{apr} = 1,8145 \text{ kg}$$

Portanto, 1 *kg* de GLP necessita de 3,604 *kg* de O_2 . Como o ar atmosférico, neste trabalho, é considerado como 79% de N_2 e 21% de O_2 , temos a quantidade de ar necessária para combustão de 1 *kg* de GLP:

$$\begin{cases} 1 \text{ kg de ar} & \longrightarrow 0,21 \text{ kg de } O_2 \\ M_{art} & \longrightarrow 3,604 \text{ kg de } O_2 \end{cases}$$

$$M_{art} = 17,162 \text{ kg}$$

Deste modo, como se tem o valor de vazão mássica do GLP em uma hora, pode-se determinar a quantidade de O_2 por hora de funcionamento do queimador. Assim, para o tempo de uma hora de funcionamento, temos 0,6 *kg* de GLP utilizado, ou seja:

$$\begin{cases} 1 \text{ kg de GLP} & \longrightarrow 3,604 \text{ kg de } O_2 \\ 0,6 \text{ kg} & \longrightarrow M_{O_2} \end{cases}$$

$$M_{O_2} = 2,1624 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Portanto, para o uso de uma hora do queimador temos o consumo de $M_{O_2} = 2,1624 \text{ kg/h}$ de O_2 . Contudo, como deve-se saber a quantidade de ar atmosférico necessário, então:

$$\begin{cases} \text{kg de ar} & \longrightarrow & 0,21 \text{ kg de } O_2 \\ M_{ar} & \longrightarrow & 2,1624 \text{ kg de } O_2 \end{cases}$$

$$M_{ar} = 10,297 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Para transformar a vazão mássica de ar em vazão volumétrica têm-se, as variáveis: temperatura, pressão, e a constante dos gases, $R_d = 287 \text{ kJ/kg}$ (considerando ar seco). Assim, pode-se determinar a densidade a partir da lei dos gases ideais, para posteriormente determinar a vazão volumétrica de ar necessária.

A lei dos gases ideais pode ser expressa como:

$$P = \rho RT \quad (4.8)$$

onde:

$$P = 101,325 \text{ kPa};$$

$$R_d = 287 \text{ kJ/kg};$$

$$T = 298,15 \text{ K};$$

$$\rho_{ar} = 1,184 \text{ kg/m}^3.$$

O volume é uma relação direta da massa pela densidade do elemento analisado, a partir dessa relação, tem-se a quantidade volumétrica ocupada por uma determinada massa, ou seja:

$$V_{ar} = \frac{m}{\rho_{ar}} \quad (4.9)$$

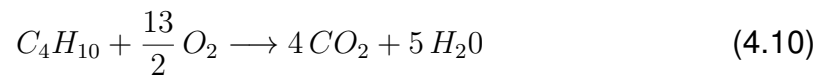
Portanto, a vazão volumétrica necessária para funcionamento de uma hora do queimador é:

$$V_{ar} = 8,697 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

4.3.2 Quantidade de CO_2 gerada pela combustão

Iniciando pelo carbono, seguindo a Tabela 5, pode-se calcular a quantidade de CO_2 :

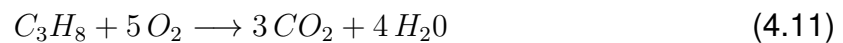
- Cálculo da quantidade de CO_2 gerada na combustão do butano:



$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ mol} \quad \longrightarrow \quad 4 \text{ mols} \\ 0,059048 \text{ kg} \quad \longrightarrow \quad 4 \times 0,04401 \text{ kg} \\ 0,3 \text{ kg} \quad \longrightarrow \quad M_{CO_2bt} \end{array} \right.$$

$$M_{CO_2bt} = 0,8944 \text{ kg}$$

- Cálculo da quantidade de CO_2 gerada na combustão do propano:



$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ mol} \quad \longrightarrow \quad 3 \text{ mols} \\ 0,044094 \text{ kg} \quad \longrightarrow \quad 3 \times 0,04401 \text{ kg} \\ 0,0999 \text{ kg} \quad \longrightarrow \quad M_{CO_2pr} \end{array} \right.$$

$$M_{CO_2pr} = 0,8983 \text{ kg}$$

Dessa forma, tem-se que a quantidade total de CO_2 produzida na combustão será:

$$M_{CO_2bt} + M_{CO_2pr} = 1,7927 \text{ kg}$$

4.4 Dimensões e parâmetros da geometria do Venturi

A densidade da mistura, ρ_m , é dada por,

$$\rho_m = \frac{M_{ar} + M_f}{V_{ar} + V_f} \quad (4.12)$$

onde:

- vazão mássica do ar : $M_{ar} = 10,297 \text{ kg/h}$;
- vazão mássica do combustível : $M_f = 0,6 \text{ kg/h}$;
- vazão volumétrica de ar : $V_{ar} = 8,697 \text{ m}^3/\text{h}$;
- vazão volumétrica de combustível : $V_f = 0,246 \text{ m}^3/\text{h}$.

Portanto, tem-se:

$$\rho_m = 1,22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

A partir de análises feitas por Ibañez (2005), pode-se definir o diâmetro da garganta d_g pela Equações 3.3 e 3.4. Onde:

Tabela 6 - Variáveis para cálculo da equação de d_g

| Variáveis | Resultado |
|---|---------------------------------|
| Densidade do combustível | $\rho_f = 2,44 \text{ kg/m}^3$ |
| Densidade do ar | $\rho_a = 1,184 \text{ kg/m}^3$ |
| Diâmetro do injetor | $d_i = 0,85 \text{ mm}$ |
| Densidade da mistura | $\rho_m = 1,22 \text{ kg/m}^3$ |
| Quantidade de ar teórico do sistema | $A = 5,75 \text{ mols}$ |
| Parâmetro de aeração | $n = 1$ |
| Relação volumétrica de ar e combustível | $R = 27,37$ |

Fonte : Autoria própria

Finalmente obtém-se o diâmetro da garganta:

$$d_g = 0,0135 \text{ m}$$

A distância que o bico injetor deve ficar da garganta do venturi:

$$L_{ig} = 55,1 \text{ mm}$$

O comprimento do difusor, L_d , foi adotado 5,5 da faixa entre 4 ↔ 7, assim tem-se:

$$L_d = 74,25 \text{ mm}$$

O comprimento do bocal de entrada, admitindo o valor de 25% de L_{ig} , fica:

$$L_c = 13,75 \text{ mm}$$

O diâmetro do bocal de entrada, de acordo com Ibañez (2005), a seção convergente α_c deve ter um ângulo em torno de 14° a 20°, o ângulo adotado foi de 17°.

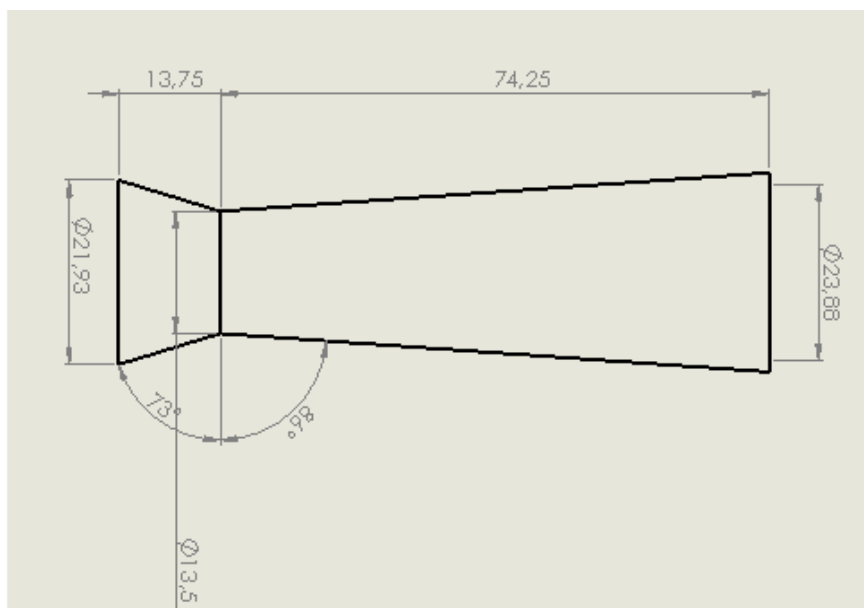
$$d_e = 21,93 \text{ mm}$$

A seção divergente, α_d , deve ter um ângulo em torno de 3° a 5°; adotando o ângulo de 4°, tem-se:

$$d_{exp} = 23,88 \text{ mm}$$

Calculadas todas as dimensões recomendadas tem-se então o queimador atmosférico dimensionado, a seguir na Figura 8, é apresentada as dimensões finais do queimador.

Figura 8 - Dimensões tubo Venturi



Fonte : Aatoria Própria

4.5 Cálculo da potência térmica do queimador

A potência térmica do queimador pode ser determinada pela Equação 3.2:

$$\dot{Q}_t = \dot{m}_{real} PCI$$

Desconsiderando os efeitos de compressibilidade do gás, tomando a vazão mássica real como sendo a vazão mássica de serviço do botijão de gás P13, e ainda o PCI é o poder calorífico inferior igual a $11\,000\text{ kcal/kg}$ e \dot{m}_{real} é considerada, neste caso, como \dot{m}_{ideal} igual a $0,6\text{ kg/h}$, então:

$$\dot{Q}_t = 27,63 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Portanto, para determinar em quanto tempo será obtido a fusão do alumínio, faz-se necessário determinar o tempo para atingir a temperatura desejada no interior do forno e posteriormente fazer uma análise com as potências encontradas, onde a perda de calor por transferência é de $\dot{Q}_{P/h} = 281,62\text{ J/h}$, a energia necessária para fundir o alumínio é de $Q_f = 999,35\text{ J}$ e a potência fornecida pelo queimador é de $\dot{Q}_t = 27,63\text{ kJ/h}$, tem-se assim:

$$\dot{Q}_r = 27,35 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Então, para determinar o tempo necessário para que a parte interna do forno atinja $676^{\circ}C$, pode ser calculada pela equação:

$$Q_r = m c_p \Delta T \quad (4.13)$$

Sendo que, a partir do c_p do ar igual a $1,0048 \text{ kJ/kg}^{\circ}C$, a massa de ar m no interior do forno igual a $0,0184 \text{ kg}$, a temperatura desejada de $T_2 = 676^{\circ}C$ menos a temperatura ambiente de $T_1 = 25^{\circ}C$, tem-se:

$$t = 5,28 \text{ min}$$

Para obter o tempo necessário para fundição, depois que o forno atinge a temperatura desejada tem-se:

$$\left\{ \begin{array}{ll} 27,35 \text{ kJ} & \longrightarrow 1 \text{ h} \\ 999,35 + 1000,7 \text{ J} & \longrightarrow t \end{array} \right.$$

$$t = 4,4 \text{ min}$$

Ou seja, para fundir $1,7 \text{ kg}$ de alumínio, o tempo necessário é de $9,7$ minutos.

5 Resultados e Conclusões

Para o projeto do queimador fez-se necessário também o dimensionamento do forno, ao qual teve base no cadinho utilizado, disponível no *campus* UTFPR-PB. A partir disso, selecionou-se os materiais adequados para uma futura fabricação do forno, levando em consideração os fatores de perda de energia, materiais economicamente viável e também que teriam uma boa resistência às altas temperaturas.

Com o intuito de aplicação no meio acadêmico, selecionou-se o combustível GLP, o qual se apresentou a melhor escolha, tanto em questões econômicas como também de aplicação, pois é um combustível de fácil acesso, gerando uma potência térmica total do queimador de $\dot{Q}_t = 27,63 \text{ kJ/h}$.

Com base nas dimensões do cadinho selecionado obteve-se a capacidade de carga de serviço. Com essa capacidade de carga e também com base nas propriedades do alumínio, na temperatura ambiente, foi calculado a energia necessária para ocorrer sua fusão ($Q_f = 999,35 \text{ J}$). A perda pela transferência de calor por condução é $\dot{Q}_{P/h} = 281,62 \text{ J/h}$, assim, a energia térmica total para fundir $1,7 \text{ kg}$ de alumínio em $9,7 \text{ min}$ será de 128 kJ .

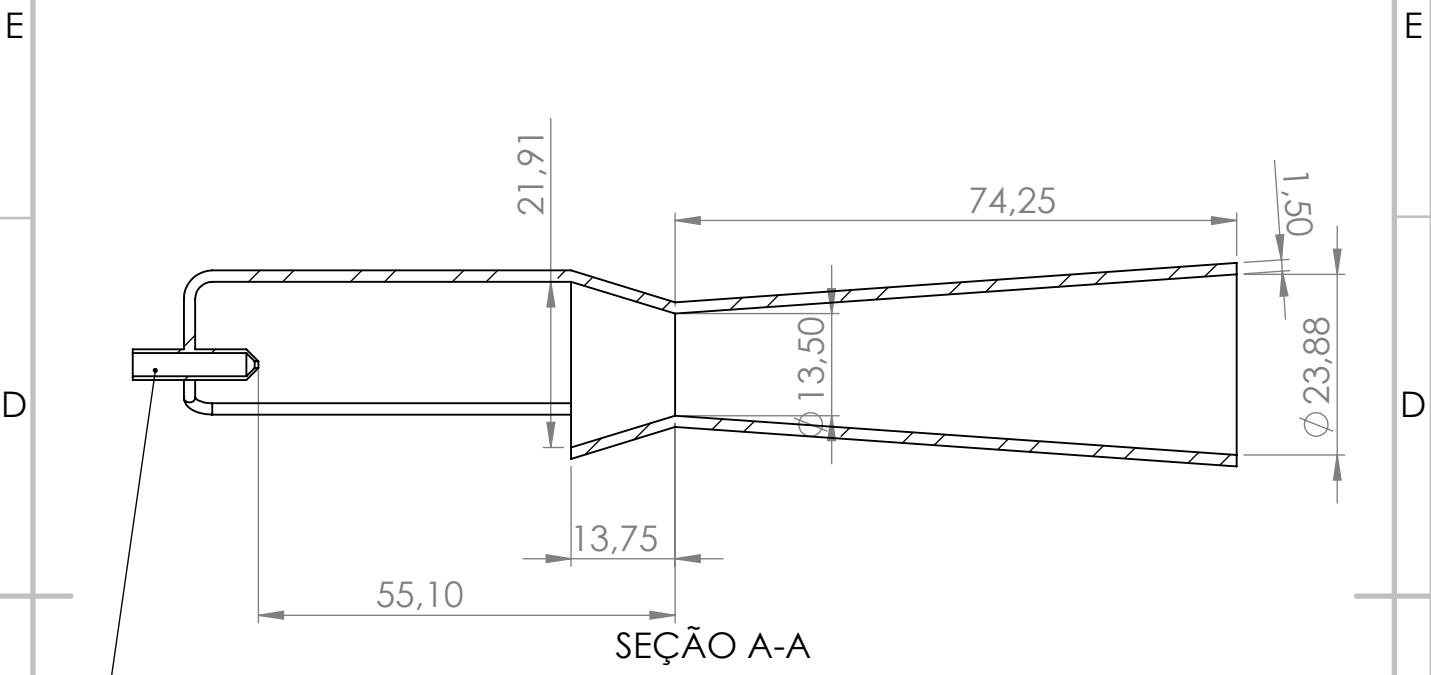
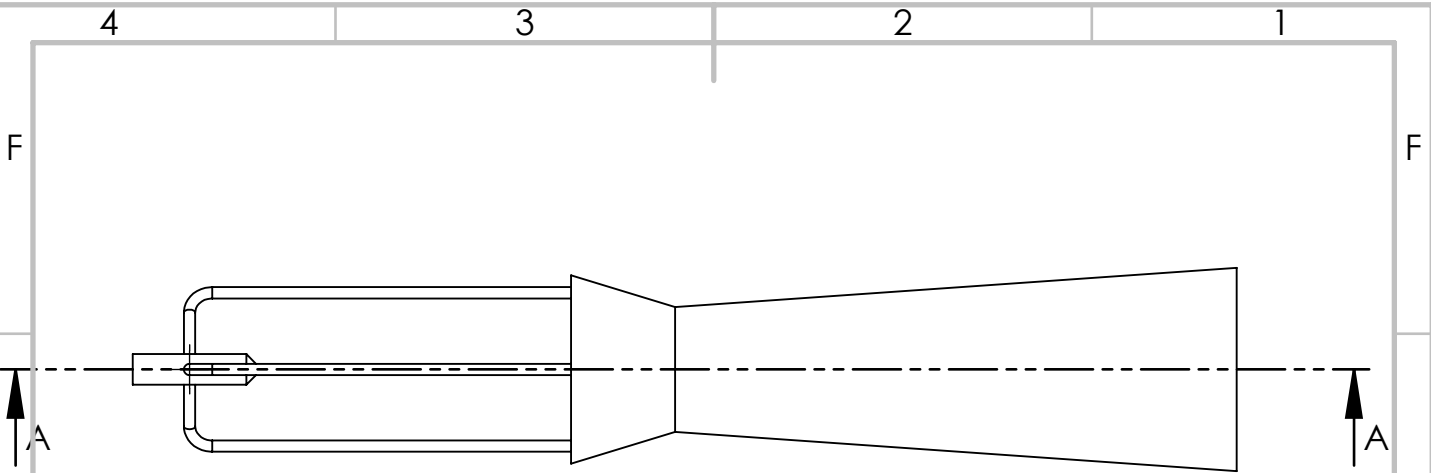
A partir das equações apresentadas ao longo do trabalho, obteve-se então as dimensões apropriadas para o queimador, as quais podem ser observadas nos desenhos do Apêndice.

Referências

- ABAL. Alumínio. 2016. Brasil, Outubro 2016. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/>>. Acesso em: 21 out. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- BEJAN, A.; KRAUS, A. D. *Heat transfer handbook*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. Citado na página 26.
- CHANG, R. *Físico Química para as ciências químicas e biológicas*. São Paulo: AMGH Editora Ltda, 2008. 589 p. Citado na página 27.
- CORONA. *Corona Cadinhos*. 2017. Disponível em: <<http://www.coronabrasil.com/cadinhos-carbeto-silicio.html>>. Acesso em: 02 de maio de 2017. Citado na página 35.
- DUARTE, I. Cadinhos para fundição. *SOCIESC (Sociedade Educacional de Santa Catarina)*, 2008. Joinville, Agosto 2008. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/zerodois/cadinho-para-fundio>>. Acesso em: 18 Setembro. 2016. Citado 4 vezes nas páginas 21, 29, 30 e 35.
- HOLMAN, J. *Transferência de Calor*. 10. ed. Mexico: Continentall, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- IBAÑEZ, W. A. C. *Análise e desenvolvimento de uma metodologia de projeto de queimadores atmosféricos tipo tubo perfurado*. 154 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. Citado 5 vezes nas páginas 31, 32, 33, 43 e 44.
- IBAR. Refratários. 2016. Poá - SP, Set. 2016. Disponível em: <<http://www.ibar.com.br/>>. Acesso em: 21 set. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 24.
- INCROPERA, F. et al. *Fundamentos de transferência de calor*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. Citado na página 22.
- MOURÃO, M. *Introdução à siderurgia*. São Paulo: ABM (Associação Brasileira de Metalurgia e Materias), 2007. 428 p. Citado na página 22.
- OLIVEIRA, B. Fundição. *Rede e-Tec*, 2013. Belém, Julho 2013. Disponível em: <http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifpa/tecnico_metalurgica/fundicao.pdf>. Acesso em: 20 Setembro. 2016. Citado na página 19.
- PEREIRA, M. et al. Aplicação do gás natural na indústria metalúrgica. *Instituto Superior Tupy – Sociedade Educacional de Santa Catarina*, 2005. Joinville-SCI, 2005. Citado na página 19.
- PETROBRAS. Gás liquefeito de petróleo. *Petrobras - BR*, 2013. Brasil, Outubro 2013. Disponível em: <<http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/public-downloads/manual-tecnico-gas-liquefeito-petrobras-assistencia-tecnica-petrobras.pdf>>. Acesso em: 21 Setembro. 2016. Citado na página 25.

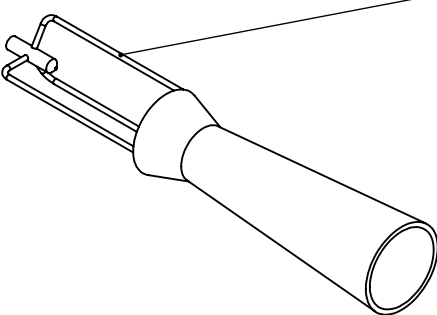
VLASSOV, D. *Combustíveis, combustão e câmaras de combustão*. Curitiba: UFPR, 2001. 185 p. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 39.

APÊNDICE A – Detalhamento do forno cadinho e seus componentes



Injetor de gás com diametro de saída d=0,85mm

Suporte Utilizado para fixação



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:
Usinado

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

| NOME | ASSINATURA | DATA |
|-----------------------------------|------------|------------|
| DESENHADOR: Queimador atmosferico | | 21/05/2017 |
| VERIF. | | |
| APROV. | | |
| MANUF. | | |
| QUALID. | | |

| |
|---|
| TÍTULO: Queimador atmosferico |
| DES. Nº 01 |
| A4 |
| ESCALA: 1:1 |
| FOLHA 1 DE 1 |

4

3

2

1

F

F

80

196

$\varnothing 397,50$

E

E

$\varnothing 50$

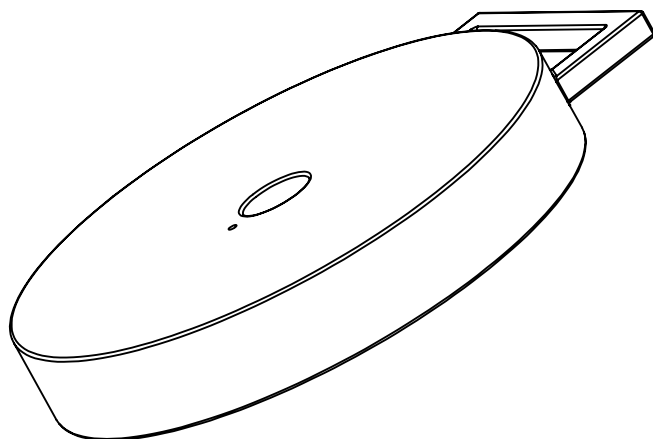
D

D

65

C

C



B

B

SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:
Soldagem/usinagem

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

| | NOME | ASSINATURA | DATA |
|--------|------------------|------------|------------|
| DESEN. | Tampa Basculante | | 21/05/2017 |
| VERIF. | | | |
| APROV. | | | |
| MANUF | | | |
| QUALID | | | |

MATERIAL:
SAE1020-Refratário Silício aluminoso

PESO:
53

TÍTULO:
Tampa Basculante

DES. Nº
02

A4

ESCALA:1:5

FOLHA 1 DE 1

4

3

53

2

1

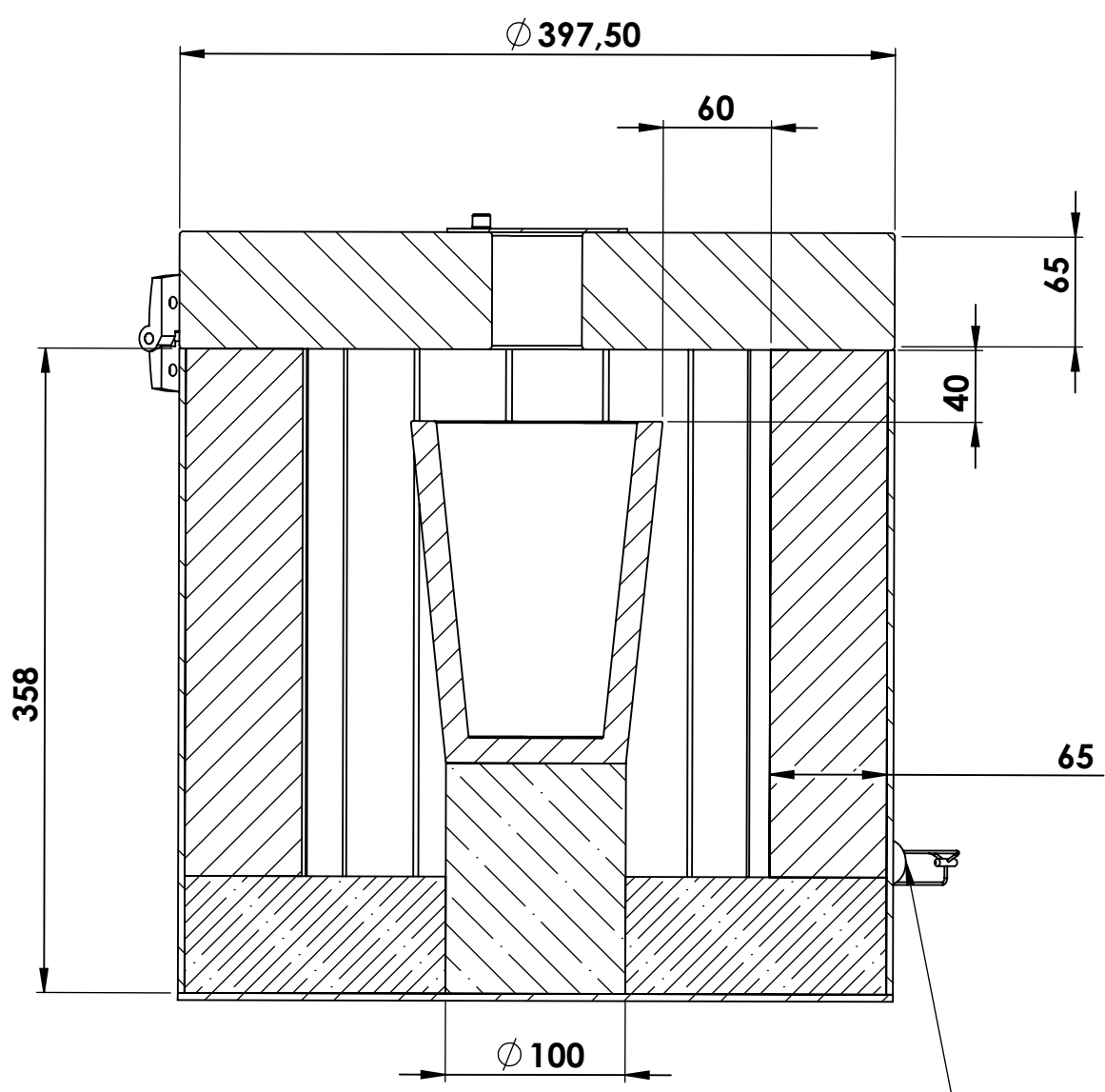
A

A

4 3 2 1

F

F



Queimador deve ser posicionado tangente a parede interna do forno

C

C

B

B

SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:
Conformado/usinado/soldado

REBARBAR E QUEBRAR
ARESTAS AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO REVISÃO

| | NOME | ASSINATURA | DATA |
|--------|---------------|------------|------------|
| DESEN. | Forno Cadinho | | 21/05/2017 |
| VERIF. | | | |
| APROV. | | | |
| MANUF | | | |
| QUALID | | | |

| | |
|--|--------------------------|
| TÍTULO: Forno cadinho | |
| MATERIAL: SAE 1020 - Silico Aluminoso | DES. Nº 03 |
| PESO: 54 | ESCALA:1:10 FOLHA 1 DE 1 |

A

A

4 3 2 1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

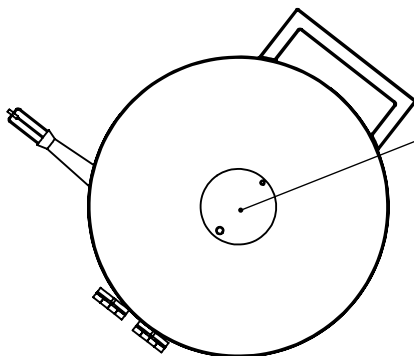
D

C

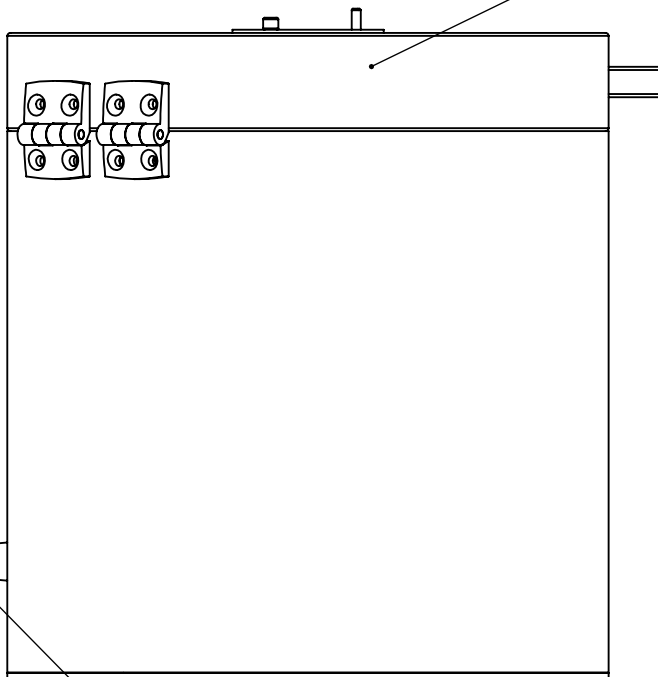
C

B

B



Tampa de abertura para saída dos gases



Tampa basculante



Queimador atmosferico

SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

| | NOME | ASSINATURA | DATA | |
|--------|------|------------|------|--|
| DESEN. | | | | |
| VERIF. | | | | |
| APROV. | | | | |
| MANUF | | | | |
| QUALID | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

TÍTULO:
Forno Montado

MATERIAL:

DES. Nº

04

A4

PESO:

55

ESCALA:1:10

FOLHA 1 DE 1

4

3

2

1

A

A

APÊNDICE B – Pinça utilizada na remoção do cadinho do interior do forno

4

3

2

1

F

F

E

E

D

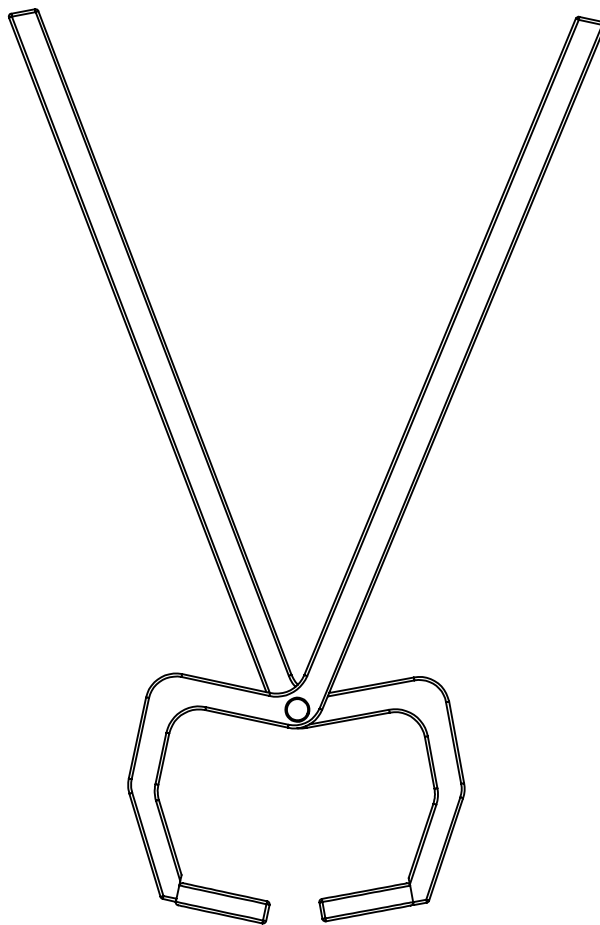
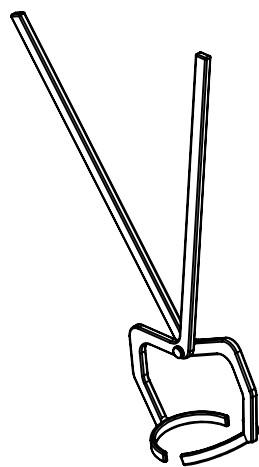
D

C

C

B

B



| Nº DO ITEM | Nº DA PEÇA | DESCRIÇÃO | QTD. |
|------------|-------------------|-----------|------|
| 1 | Haste da pinça | | 2 |
| 2 | Parafuso de uniao | M10X0,75 | 1 |
| 3 | Argola | | 2 |

SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

| | NOME | ASSINATURA | DATA |
|--------|------------------|------------|------------|
| DESEN. | João Paulo Ramos | | 24/05/2017 |
| VERIF. | | | |
| APROV. | | | |
| MANUF | | | |
| QUALID | | | |

TÍTULO:

Montagem da Pinça

DES. Nº

05

A4

PESO:

58

ESCALA:1:10

FOLHA 1 DE 1

4

3

2

1

A

A

4

3

2

1

F

F



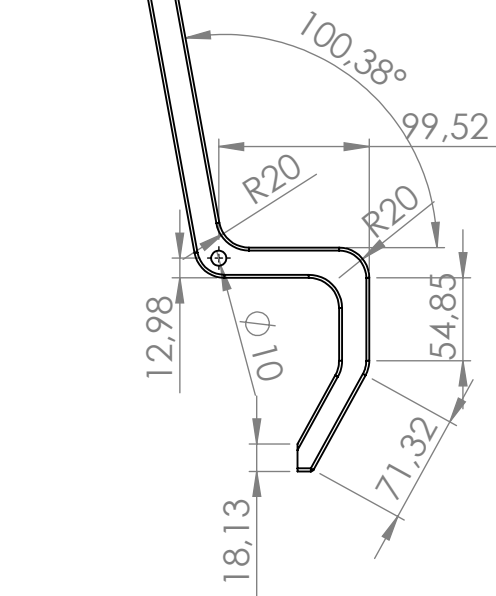
E

E



D

D



C

C

B

B

SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:
Conformada/usinada

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

| | NOME | ASSINATURA | DATA |
|---------|------------------|------------|------------|
| DESEN. | João Paulo Ramos | | 24/05/2017 |
| VERIF. | | | |
| APROV. | | | |
| MANUF. | | | |
| QUALID. | | | |

TÍTULO:
Haste da Pinça

MATERIAL:
SAE 1020

DES. Nº
06

A4

PESO:
59

ESCALA:1:5

FOLHA 1 DE 1

4

3

2

1

A

A

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

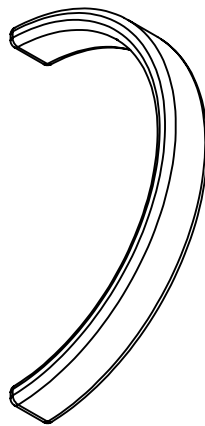
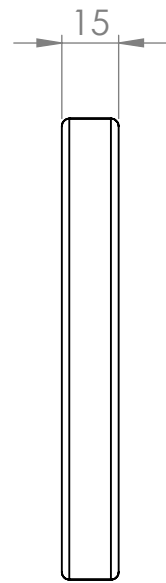
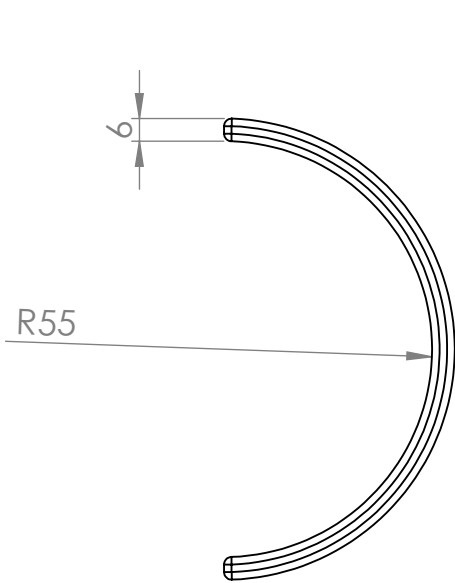
C

B

B

A

A



SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:
Conformado/Usinado

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

| | NOME | ASSINATURA | DATA | | |
|---------|------------------|------------|------------|-----------|----|
| DESEN. | João Paulo Ramos | | 24/05/2017 | | |
| VERIF. | | | | | |
| APROV. | | | | | |
| MANUF. | | | | | |
| QUALID. | | | | MATERIAL: | |
| | | | | SAE 1020 | |
| | | | | PESO: | 60 |

| | | |
|--------------------------------|----------------------------|-----------|
| <p>TÍTULO:</p> <h1>Argola</h1> | <p>DES. Nº</p> <h1>07</h1> | <p>A4</p> |
| <p>ESCALA:1:1</p> | <p>FOLHA 1 DE 1</p> | |