

LARISSA BARBOSA RÉBOLA

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM FORNO A PLASMA PARA
VITRIFICAÇÃO DE CINZAS**

LARISSA BARBOSA RÉBOLA

ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM FORNO A PLASMA PARA
VITRIFICAÇÃO DE CINZAS

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli

Guaratinguetá
2016

R292a

Rebola, Larissa Barbosa

Análise de eficiência energética de um forno a plasma para vitrificação de cinzas / Larissa Barbosa Rebola – Guaratinguetá, 2016.

63 f : il.

Bibliografia: f. 60-63

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli

1. Fornalhas 2. Fornos 3. Jato de plasma 4. Resíduos industriais - Aspectos ambientais I. Título

CDU 66.041

Larissa Barbosa Rébola

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”


APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. ALEX MENDONÇA BIMBATO
UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI
UNESP-FEG

Dezembro de 2015

Para Deus, pelo amor incondicional. Aos meus pais, pelo carinho, dedicação e confiança, tão inerentes àqueles que nos ensinam sobre a vida adulta. Ao Carlos, cujo otimismo serviu de inspiração e a cumplicidade de pilar.

AGRADECIMENTOS

Obrigada, Deus, por seu Filho, por suprir minhas necessidades e recompensar meus esforços, e me presentear com oportunidades e pessoas sem as quais não desfrutaria deste momento.

Agradeço também aos meus pais, que por toda a minha vida me incentivaram e se esforçaram para que eu pudesse fazer as minhas escolhas. Por cada apostila vermelha, cada lição tomada, a doçura com a qual me corrigiram e acreditaram na minha capacidade, de uma forma única se alegram de minhas conquistas como se fossem suas, pois de fato são.

Ao meu querido Carlos, pela infinita paciência e compreensão durante as vigílias de estudo, pela dádiva de sua companhia, pelos conselhos gentis e otimistas que me tornaram confiante e persistente.

Ao meu orientador, Prof. José Alexandre Matelli pela dedicação e inspiração durante as disciplinas ministradas, a disponibilidade que sempre manifestou e a empatia com que recebeu as minhas ideias, me permitindo vencer as inseguranças deste processo.

Aos professores da banca examinadora e demais professores da FEG por oferecerem parte de suas vidas à valiosa tarefa de ensinar.

A equipe do projeto Vitrisol, em especial ao Eng. Marco Antônio de Souza e Prof. Homero Santiago Maciel, por me concederem a oportunidade de participar desse projeto, e conseqüentemente, contribuírem para meu amadurecimento profissional.

“Se você tem certeza dos fatos, você deve defender sua posição.”

Cecilia Payne-Gaposchkin

REBOLA, L. B. **Análise de eficiência energética de um forno a plasma para vitrificação de cinzas**. 2016. 63 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

Os níveis elevados de geração de lixo induzem à criação de novos modelos de gestão de resíduos sólidos. As usinas de incineração não constituem uma prática efetiva para a disposição final dos resíduos, pois a queima do lixo produz cinzas volantes altamente perigosas. Assim, a tecnologia do plasma térmico mostra-se uma solução potencial para o tratamento de diversos tipos de resíduos, através da vitrificação. O processo de vitrificação promove a destruição e/ou a inertização dos contaminantes em um produto vítreo, que pode ser aproveitado industrialmente. Considerando a aplicação deste tipo de processo, um balanço global de energia é realizado em um forno para vitrificação de cinzas de incineração. Os princípios de geração de plasma térmico e suas vantagens são brevemente descritos, em conjunto com os conceitos fundamentais de transferência de calor e Termodinâmica. As perdas energéticas através das paredes do forno são avaliadas por meio de um modelo numérico simples. O balanço de energia na tocha geradora de plasma fornece informações importantes a respeito da alta intensidade de energia fornecida pelo jato de plasma. Finalmente, avalia-se a eficiência térmica e capacidade de processamento, gerando resultados básicos para o projeto desse tipo de forno.

PALAVRAS-CHAVE: Forno, Vitrificação, Plasma térmico, Balanço global de energia.

REBOLA, L. B. **Energy efficiency analysis of a plasma furnace for vitrification of ash.** 2016. 63 f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

A high level of waste generation leads to the creation of new waste management models. Incineration plants are not an effective practice for the final disposal of waste because the burning process produces highly dangerous fly ash. Thus, the thermal plasma technology is shown to be a potential solution for the treatment of various types of waste for vitrification. The vitrification process promotes the destruction and/or inertization of the contaminants in a glassy product, which can be used industrially. Considering the application of this type of process, a global energy balance is carried out in a furnace for vitrification of incinerator fly ash. The principles of thermal plasma generation and their advantages are briefly described together with the fundamental concepts of heat transfer and Thermodynamic. The energy losses through the furnace walls are evaluated by means of a simple numerical model. The energy balance in the plasma torch provides important information about the high intensity of energy supplied by the plasma jet. Finally, it is evaluated the thermal efficiency and processing capacity, generating basis results for design of this type of furnace.

KEYWORDS: Furnace, Vitrification, Thermal plasma, Global energy balance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - a) Geração de RSU no Brasil; b) destinação final do RSU coletado no Brasil.	15
Figura 2 – Cinzas vitrificadas.	17
Figura 3 – Manifestações do plasma: a) fogo; b) raios; c) aurora boreal; d) galáxias; e) estrelas f) nebulosas.	19
Figura 4 – Geração do plasma em: a) tocha de arco não transferido; b) tocha de arco transferido.	21
Figura 5 – Plasma gerado por uma tocha de corrente contínua e arco não transferido.	22
Figura 6 – Tocha de plasma de arco não transferido: a) eletrodo frio; b) eletrodo quente.	22
Figura 7 – Forno empregado para vitrificação de cinzas, laboratório Vitrisol.	31
Figura 8 – a) Dimensões do forno; b) Componentes do forno (dimensões em milímetros).	32
Figura 9 – Composição das paredes do forno (dimensões em milímetros).	33
Figura 10 – Condutividade térmica da placa isolante.	35
Figura 11 – Condutividade térmica da manta isolante.	36
Figura 12 – Plasma gerado com mistura de ar e gás natural por tocha utilizada no estudo.	38
Figura 13 – Detalhes da tocha empregada no forno estudado (dimensões em milímetros).	38
Figura 14 – a) Bagaço de cana; b) cinza de bagaço de cana.	39
Figura 15 – Geometria simplificada do forno.	41
Figura 16 – Malha gerada para o modelo.	42
Figura 17 – Variação do coeficiente convectivo com a temperatura de filme para paredes horizontais, com a superfície aquecida voltada para cima.	44
Figura 18 – Variação do coeficiente convectivo com a temperatura de filme para paredes horizontais, com a superfície aquecida voltada para baixo.	45
Figura 19 – Variação do coeficiente convectivo com a temperatura de filme para paredes verticais.	45
Figura 20 – Esquematização do balanço de energia na tocha de plasma.	47
Figura 21 – Variação do calor específico com a temperatura, para plasmas gerados a ar.	48
Figura 22 – Esquematização do balanço de energia no forno.	49
Figura 23 – Distribuição de temperaturas obtida através do modelo numérico.	51
Figura 24 – Entalpia versus potência elétrica consumida pela tocha de plasma.	52
Figura 25 – Entalpia do plasma a ar versus temperatura.	53
Figura 26 – Etapas realizadas para obtenção dos resultados.	55
Figura 27 – Distribuição de temperatura obtida com adição do tijolo isolante.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição e principais propriedades do tijolo refratário (<i>sillimanite</i>).	34
Tabela 2 – Composição e principais propriedades da placa isolante.	35
Tabela 3 – Composição e principais propriedades da manta isolante.	36
Tabela 4 – Principais propriedades do aço inoxidável.	37
Tabela 5 – Resumo dos resultados obtidos.	54
Tabela 6 – Composição e principais propriedades do tijolo isolante.	56
Tabela 7 – Resultados obtidos com a adição do tijolo isolante.	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1– Resumo de correlações empíricas para a convecção natural.	29
Quadro 2 – Resumo do modelo numérico empregado.	43

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área [m ²]
C_p	calor específico [J/kgK]
E_{total}	energia total [J]
$E_{útil}$	energia útil [J]
\dot{E}	taxa de geração de energia [W]
g	aceleração da gravidade [m/s ²]
h	coeficiente de transferência de calor por convecção local [W/m ² K]
\bar{h}	coeficiente de transferência de calor por convecção médio [W/m ² K]
h_{ar}	entalpia do ar [J/kg]
h_e, h_s	entalpia de entrada e saída do volume de controle [J/kg]
h_{lv}	entalpia de vaporização da água [J/kg]
h_{pl}	entalpia do plasma [J/kg]
h_{ref}	entalpia de referência [J/kg]
k	condutividade térmica [W/mK]
L	comprimento característico [m]
\dot{m}	vazão mássica [kg/s]
\overline{Nu}	número de Nusselt [-]
p	pressão [Pa]
PCI	poder calorífico inferior [J/kg]
P_{elet}	potência elétrica [W]
\dot{Q}	taxa de transferência de calor [W]
q''	fluxo térmico [W/m ²]
\dot{q}	taxa de geração de energia por unidade de volume [W/m ³]
q	taxa de transferência de calor [W]
Ra	número de Rayleigh [-]
t	tempo [s]
T	temperatura [K]
u	energia interna [J/kg]
v	volume específico [m ³ /kg]
V	velocidade do fluido [m/s]
\dot{W}	taxa na qual o trabalho é realizado [W]
Z	cota [m]

Letras gregas

α	difusividade térmica [m ² /s]
β	coeficiente de expansão térmica [1/K]
η	rendimento térmico [-]
ν	viscosidade cinemática [m ² /s]
ρ	massa específica [kg/m ³]

Subscritos

ag	água
ar	ar atmosférico
c	cinza seca

<i>c, u</i>	cinza úmida
<i>cond</i>	condução
<i>e</i>	estado de um fluido que entra no volume de controle
<i>g</i>	gases de exaustão
<i>GN</i>	gás natural
<i>L</i>	baseado no comprimento característico
<i>vt</i>	material vitrificado
<i>pl</i>	jato de plasma
<i>ref</i>	referência
<i>s</i>	estado de um fluido que sai no volume de controle
<i>sup</i>	superficial
<i>vap</i>	vaporização da água
<i>V.C.</i>	volume de controle
<i>x</i>	condição local em uma superfície
∞	condição de corrente livre

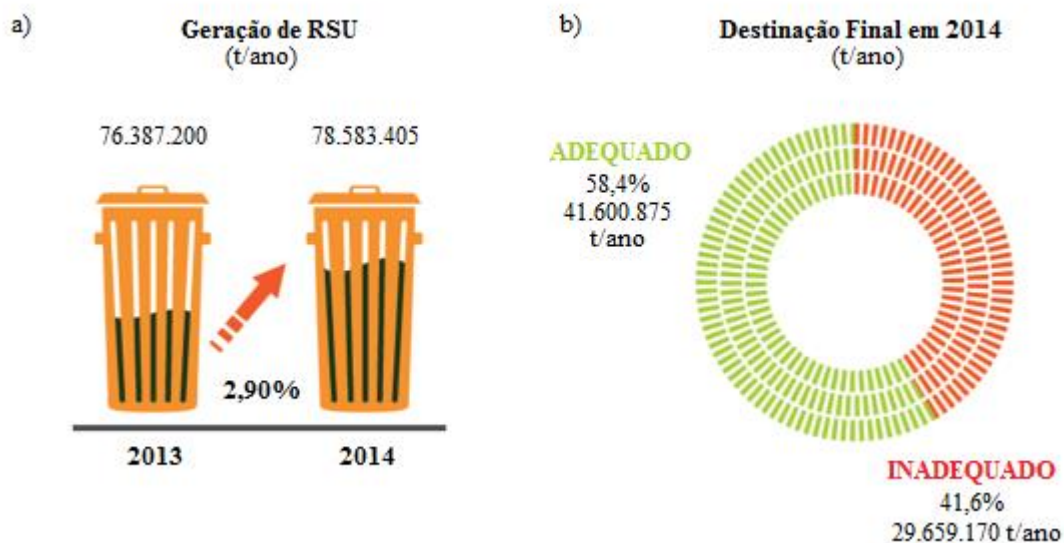
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	PLASMA	19
2.2	GERADORES DE PLASMA	20
2.3	PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA EM VOLUMES DE CONTROLE ...	23
2.4	TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	25
2.5	CRITÉRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA FORNOS ELÉTRICOS ..	29
3	METODOLOGIA	31
3.1	FORNO.....	31
3.1.1	Características.....	31
3.1.2	Materiais e Sistemas de Isolamento	33
3.1.2.1	Tijolo Refratário	33
3.1.2.2	Placa Isolante	34
3.1.2.3	Manta Isolante	35
3.1.2.4	Aço Inoxidável.....	36
3.2	TOCHA DE PLASMA	37
3.3	CINZAS DE BAGAÇO DE CANA	39
3.4	SIMULAÇÃO DO FORNO	40
3.4.1	Simulação Numérica do Forno	40
3.4.2	Coefficientes de Convecção Natural.....	43
3.5	BALANÇO DE ENERGIA	46
3.5.1	Balanco Global de Energia da Tocha.....	46
3.5.1.1	Temperatura do Plasma	47
3.5.2	Balanco Global de Energia do Forno	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	58

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da economia brasileira é historicamente acompanhado pelo aumento do consumo em todos os níveis sociais. Decorrente disso, a demanda pela extração de matéria-prima e a produção aumentam e, conseqüentemente, a geração de resíduos sólidos também. Segundo pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2014), estima-se que o Brasil gera 78,6 milhões de t/ano de resíduos sólidos urbanos (RSU), sendo que 41,6% seguem para vazadouros a céu aberto (lixões) ou aterros controlados (Figura 1). Estes últimos pouco se diferem dos lixões do ponto de vista ambiental, por empregarem procedimentos ineficientes e tecnologicamente pouco refinados, além de exigirem vasta área para sua implantação. A situação se configura como um cenário de destinação reconhecidamente inadequado, que requer soluções prementes.

Figura 1 - a) Geração de RSU no Brasil; b) destinação final do RSU coletado no Brasil.



Fonte: Adaptado de (ABRELPE, 2014).

No caso dos resíduos industriais, a situação é ainda mais preocupante, pois além de variados (originados das atividades dos diferentes ramos industriais), estima-se que em torno de 40% desse tipo de resíduo contenha materiais perigosos, que necessitam de tratamento adequado, devido ao seu alto potencial de impacto ao meio ambiente e à saúde humana (INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, 2012).

Dessa forma, é evidente a necessidade da redução do volume de resíduos gerados e/ou torná-los inofensivos, utilizando soluções tecnologicamente viáveis e eficazes para tratar tanto os resíduos já existentes em aterros e vazadouros, quanto os gerados simultaneamente.

Outro destino considerado para os resíduos produzidos no Brasil são as usinas de incineração, que empregam combustão para destruição da fração orgânica do resíduo e redução do seu volume. Os sistemas de incineração são considerados uma tecnologia consagrada, que evoluiu ao longo dos anos. Quando adequadamente projetado, um sistema de incineração é capaz de um alto grau de destruição, porém com emissões de efluentes gasosos tóxicos. Embora ofereça benefícios para o tratamento e gestão de resíduos, existe grande oposição quanto ao licenciamento e uso das práticas de incineração, devido ao impacto ao meio ambiente e à saúde da população no entorno das usinas (MUCCIACITO, 2014). Além disso, os incineradores geram subprodutos (cinzas) considerados perigosos devido à presença de sais solúveis, metais pesados, matérias orgânicas, bem como as dioxinas e os furanos, que não podem ser depositadas no meio ambiente, e precisam ser armazenados de forma segura e onerosa (ČARNOGURSKÁ et al., 2015).

Uma possível solução para o problema ambiental do tratamento de resíduos sólidos e cinzas é a vitrificação. Utilizando a tecnologia do plasma térmico, a vitrificação é capaz de processar desde RSU até resíduos industriais e radioativos de alto nível. A vitrificação envolve a conversão de material contaminado em um silicato inerte (Figura 2), resistente, impermeável e não lixiviável, este pode ser vantajosamente aproveitado no setor de construção civil e na fabricação de produtos a base de vidro, ou descartado inofensivamente em um aterro (GOMEZ et al., 2008). Outro benefício é a possibilidade de destruição de resíduos de composição e forma variada: orgânico, inorgânico, sólido e líquido, com ou sem pré-tratamento. Assim, podem-se construir plantas de processamento flexíveis, para tratar vários tipos de resíduos. A vitrificação também reduz o volume e a área superficial dos resíduos. A redução de volume implica na diminuição do espaço necessário para o armazenamento dos resíduos. Consequentemente, ocorre a redução da área superficial que atenua a susceptibilidade da migração de contaminantes através do intemperismo e lixiviação (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1992).

Figura 2 – Cinzas vitrificadas.



Fonte: produção do autor.

Segundo Johnson (2002), embora a vitrificação, assim como a incineração, utilize calor para processar os resíduos, ambas diferem de várias maneiras. Por exemplo, a incineração é um processo de combustão (que requer oxigênio), enquanto a vitrificação envolve pirólise do material processado (não requer oxigênio). Uma vez que a vitrificação não requer ar (ou pelo menos não em grandes quantidades, apenas o essencial para a formação do jato de plasma), a vazão de efluente gasoso que requer tratamento adicional é reduzida em comparação com a incineração. Em segundo lugar, a vitrificação é independente do poder calorífico dos resíduos, enquanto a maioria dos incineradores exige uma mistura de resíduos com poder calorífico adequado. Além disso, os incineradores liberam dioxinas e formam furanos (compostos orgânicos tóxicos policlorados), devido à combustão incompleta. As elevadas temperaturas presentes no processo de vitrificação inibem a formação de compostos perigosos. Finalmente, a incineração produz cinzas lixiviáveis como subproduto, que devem ser descartadas em aterros específicos, enquanto que a vitrificação produz um subproduto vítreo que pode ser descartado seguramente, sem nenhum tratamento prévio.

A vitrificação demonstra-se versátil e tem sido empregada para diversas finalidades: para o tratamento de cinzas de incineração e asbestos em países como Japão e França; nos Estados Unidos da América essa tecnologia é dedicada para recuperação de metais de catalisadores e zinco metálico de poeira siderúrgica. A vitrificação também é utilizada para o processamento de lixo hospitalar, de lixo produzido a bordo de navios e para remoção de solos contaminados (GOMEZ et al., 2008).

1.1 JUSTIFICATIVA

A vitrificação constitui uma solução potencial para o tratamento de cinzas provenientes de usinas de incineração, ou até mesmo para o processamento direto de RSU, devendo ser considerada no que diz respeito à possibilidade de sua aplicação no cenário brasileiro de tratamento de resíduos.

No entanto, essa tecnologia consome uma grande quantidade de energia elétrica. Tendo em vista o panorama energético atual do país, devem-se encontrar formas de garantir o uso racional de energia, uma vez que esta constitui um fator de viabilização do projeto. Assim, fica evidente a necessidade de um estudo térmico do forno com a finalidade de averiguar sua eficiência e evitar o desperdício de energia elétrica e custos de operação elevados.

1.2 OBJETIVO

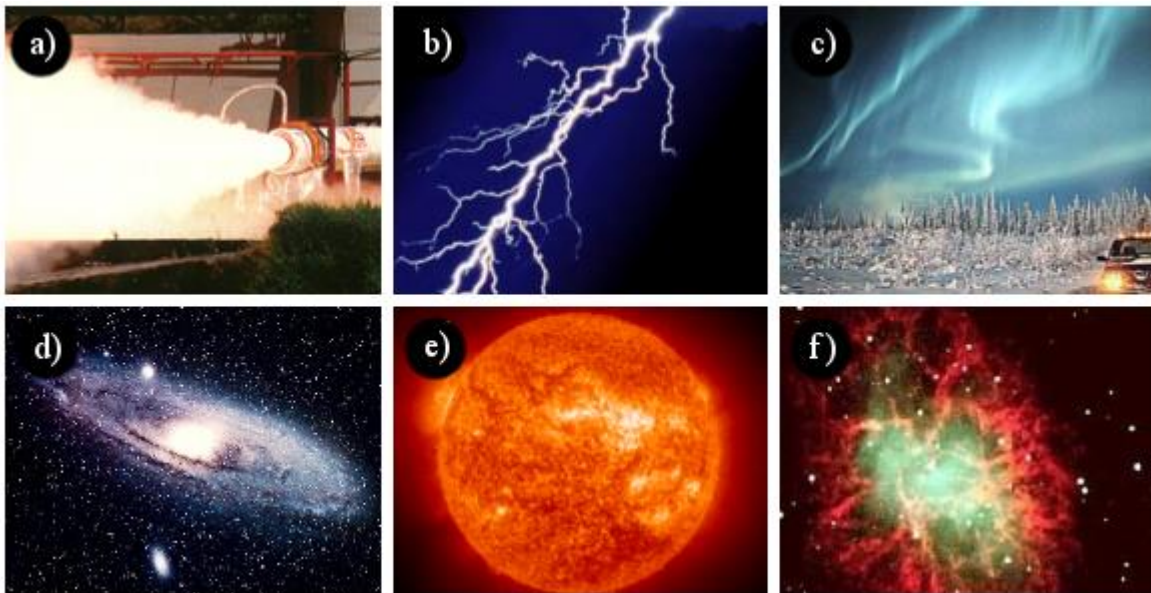
O objetivo deste trabalho é realizar o balanço global de energia em um forno de arco elétrico, que emprega plasma térmico para vitrificação de cinzas resultantes de plantas de incineração de resíduos sólidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PLASMA

O plasma é frequentemente denominado o quarto estado da matéria, e mais de 99% do universo que se conhece encontram-se neste estado. O plasma pode existir de forma natural ou sintética. Alguns exemplos naturais simples são as estrelas, as galáxias, a aurora boreal e os raios (Figura 3). O plasma é constituído por uma mistura de íons, elétrons e partículas neutras, resultantes de uma descarga elétrica. Durante uma descarga elétrica, os elétrons livres absorvem energia do campo elétrico aplicado e transferem parte dessa energia para as partículas pesadas (íons e partículas neutras). Dependendo da quantidade de energia transferida para as partículas pesadas, o plasma pode ser classificado como plasma não térmico (frio) e plasma térmico (quente) (BOULOS; FAUCHAIS; PFENDER, 1994).

Figura 3 – Manifestações do plasma: a) fogo; b) raios; c) aurora boreal; d) galáxias; e) estrelas f) nebulosas.



Fonte: Adaptado de (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE BRASÍLIA, 2004).

Os plasmas térmicos apresentam diversas vantagens, tais como altas temperaturas e intensidade, radiações não ionizantes e de alta densidade de energia. Os plasmas térmicos podem atingir temperaturas de até 20000 K ou mais, enquanto que a queima de combustíveis fósseis atinge temperaturas de até 2000 K (GOMEZ et al., 2008). Devido à elevada disponibilidade de energia térmica, quando comparado a sistemas convencionais (combustão,

resistência elétrica), o plasma possui aplicações industriais consolidadas, como corte de chapas de aço, aspersão térmica, sintetização de compostos específicos, soldagem de materiais metálicos, produção de gás de síntese, vitrificação, entre outros.

2.2 GERADORES DE PLASMA

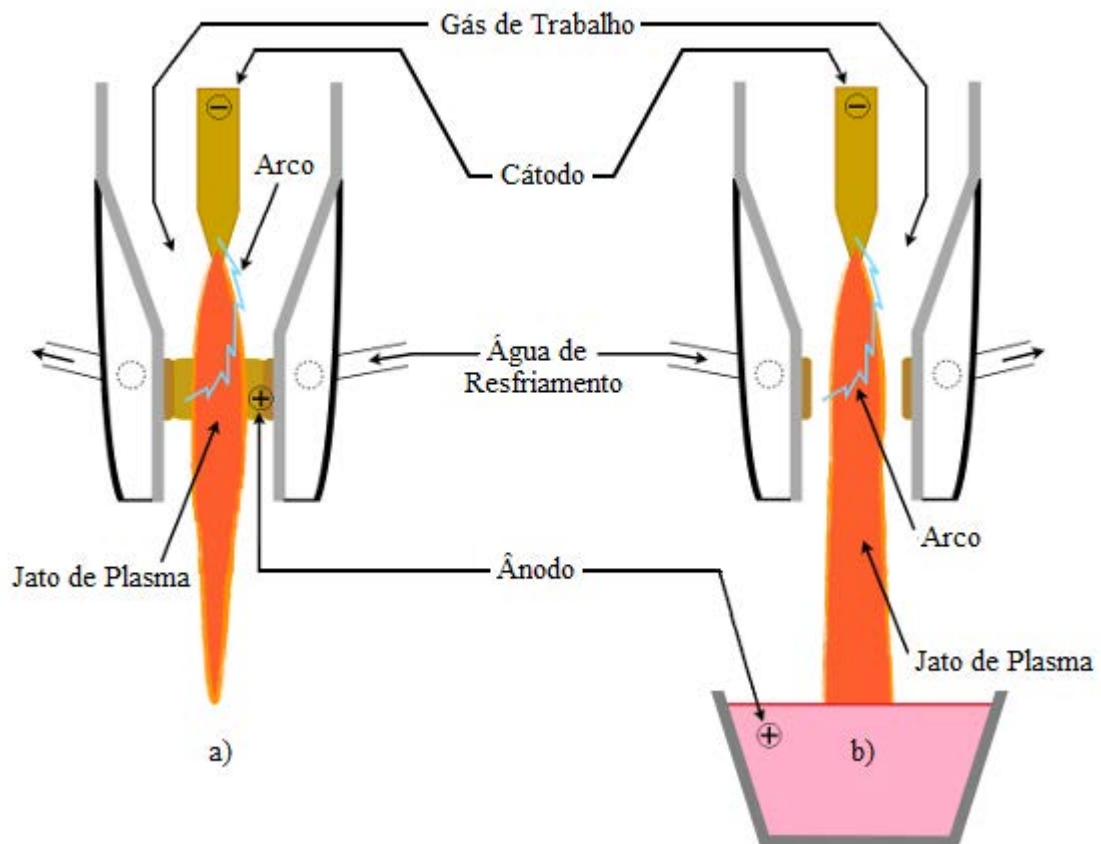
O plasma é gerado pela passagem de uma corrente elétrica através de um gás. A maioria dos gases é isolante à temperatura ambiente e, portanto, íons livres devem ser gerados para torná-lo um condutor elétrico. O processo de geração de íons livres é chamado ionização. A maneira mais comum de gerar o plasma é através da aplicação de um campo elétrico entre dois eletrodos, o que causa a ionização do gás inicialmente não condutor (BOULOS; FAUCHAIS; PFENDER, 1994).

A fim de se obter e controlar o plasma térmico, dois componentes são essenciais. O primeiro deles é o circuito elétrico, que tem como finalidade fornecer a potência elétrica necessária ao fluido de trabalho, em condições pré-estabelecidas de tensão e corrente. O segundo é a tocha de plasma, onde a interação entre o fluido de trabalho e a potência elétrica efetivamente ocorrem.

Esse equipamento é composto basicamente por dois eletrodos que são conectados na fonte elétrica, uma seção para entrada do gás de trabalho (ar, argônio, nitrogênio) e um sistema de resfriamento. O fluido é injetado através de um arco elétrico gerado pela passagem de corrente elétrica entre o cátodo e o ânodo. O gás injetado é então ionizado, atingindo temperaturas significativamente elevadas, formando o jato de plasma. O sistema de resfriamento é essencial para que tais eletrodos possam ser mantidos em temperaturas aceitáveis e não se fundam devido à proximidade ao plasma (GOMEZ et al., 2008).

As tochas de plasma térmico podem ser de arco transferido e arco não transferido, conforme Figura 4. Nas tochas de arco transferido, um dos eletrodos está localizado no interior da tocha, e o outro é o material a ser processado. Sendo assim é essencial que tal material seja um bom condutor elétrico, e o jato de plasma é formado do lado de fora do dispositivo. Esse tipo de tocha é comumente empregado para a fusão de materiais. Já nas tochas de arco não transferido, ambos os eletrodos estão no interior da tocha, e o arco também é formado no interior desta. Neste caso, a condutividade elétrica do material processado é indiferente.

Figura 4 – Geração do plasma em: a) tocha de arco não transferido; b) tocha de arco transferido.



Fonte: Adaptado de (GANDHI, 2015).

Existem muitos meios de promover a ionização dos gases, aplicando conceitos diferentes, tais como: corrente contínua, corrente alternada, rádio frequência, descargas de microondas à pressão quase atmosférica, e plasmas induzidos por laser (GOMEZ et al., 2008).

2.2.1 Tocha de Corrente Contínua e Arco Não Transferido

Tochas de corrente contínua e de arco não transferido são as mais comuns para o processamento de resíduos (GOMEZ et al. 2008). Como o material não necessita ser um bom condutor para a utilização dessas tochas, é possível processar materiais de diversas composições e propriedades. O plasma gerado por esse tipo de tocha pode ser observado na Figura 5.

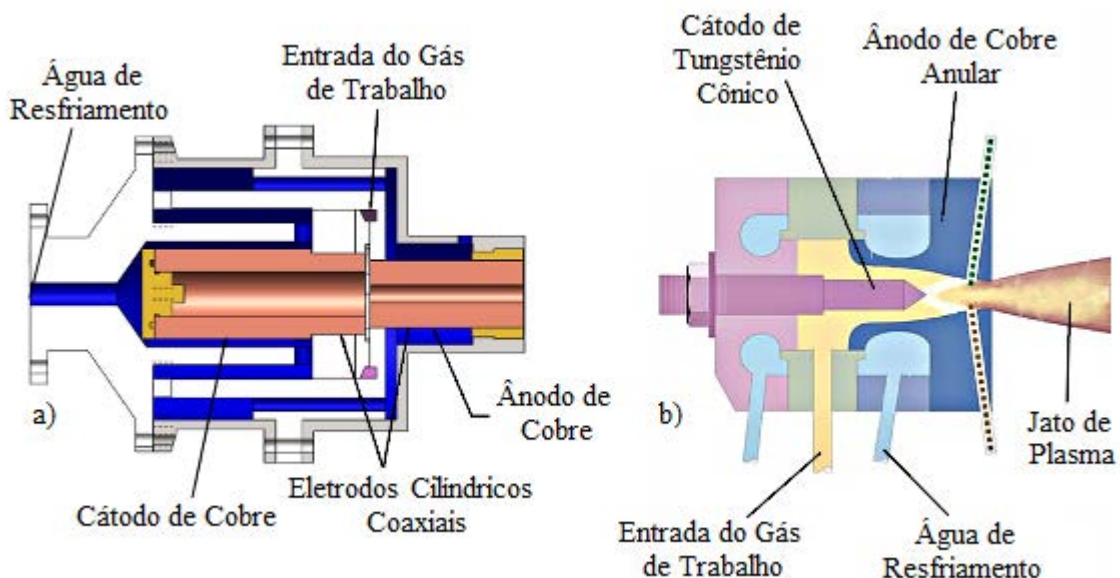
Figura 5 – Plasma gerado por uma tocha de corrente contínua e arco não transferido.



Fonte: fornecido pela equipe do projeto Vitrisol.

Existem duas principais configurações de tochas de arco não transferido: com eletrodos quentes e eletrodos frios (Figura 6). Tochas de corrente contínua com eletrodos quentes operam com níveis de potência abaixo de 100 kW, e possuem cátodo de tungstênio cônico e um ânodo de cobre anelar. Gases oxidantes não podem ser utilizados nesse tipo de tocha, uma vez que podem oxidar o eletrodo de tungstênio. As temperaturas do jato de plasma estão entre 6000 e 15000 K. As tochas com eletrodos frios são constituídas por eletrodos de cobre, de condutividade térmica elevada, e podem ser usadas com gases oxidantes. O plasma é gerado com um movimento de vórtice do ar entre os dois eletrodos tubulares coaxiais, separados por um pequeno intervalo. Podem atingir níveis de potência de 100 kW até 6 MW, com temperaturas de até 8000 K (GOMEZ et al., 2008). Atualmente, tochas deste tipo possuem eficiência, em condições otimizadas de operação, de até 80% (ESSIPTCHOUK, 2009).

Figura 6 – Tocha de plasma de arco não transferido: a) eletrodo frio; b) eletrodo quente.



Fonte: fornecido pela equipe do projeto Vitrisol; Adaptado de (UNIVERSITY OF VIRGINIA, 2014).

Um nicho de aplicação de tochas de arco não transferido, que vem crescendo e se mostrando cada vez mais promissor, está relacionado ao tratamento de resíduos e vitrificação de cinzas. Em ambos os casos, o uso da tecnologia de tochas de plasma se justifica não somente por sua eficiência, mas principalmente pela capacidade de processar tais materiais a temperaturas elevadas em reatores com atmosfera controlada ou não, garantindo que todo tipo de contaminantes presentes nos resíduos ou cinzas sejam destruídos.

2.3 PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA EM VOLUMES DE CONTROLE

Para efetuar um balanço de energia em qualquer volume de controle, o conceito da primeira lei da Termodinâmica é primordial. Define-se o volume de controle para a análise de um processo, como um volume no espaço que é objeto do estudo. Este volume é envolvido por uma superfície fechada imaginária, chamada superfície de controle, que pode ser fixa ou móvel. A dimensão e a forma do volume de controle são escolhidas com o intuito de simplificar a análise. Massa, calor e trabalho podem atravessar a superfície de controle, e a massa contida no volume de controle, bem como suas propriedades podem variar com o tempo (VAN WYLEN; BORGNAKKE; SONNTAG, 2003).

Considere-se, primeiramente, a lei da conservação da massa relacionada ao volume de controle. Se existirem vários escoamentos entrando e saindo do volume de controle, este conceito é representado matematicamente pela Eq. 1:

$$\frac{dm_{v.c.}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (1)$$

A equação da primeira lei da Termodinâmica para volumes de controle nessas condições é dada pela Eq. 2:

$$\frac{dE_{v.c.}}{dt} = \dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + gZ_s \right) \quad (2)$$

Basicamente, a Eq. 2 expressa que a energia total de um sistema é conservada e, conseqüentemente, a única forma pela qual a quantidade de energia em um sistema pode variar é se esta atravessar a superfície de controle (VAN WYLEN; BORGNAKKE; SONNTAG, 2003). Os termos na Eq. 2 relacionados à entalpia podem ser definidos como a

soma da energia interna e o trabalho do escoamento: $h = u + pv$. A energia interna pode ser subdividida em outras formas de energia como térmica, química e nuclear. A energia térmica é composta pela soma das energias latente e sensível. A energia sensível é aquela associada às mudanças de temperatura, e a energia latente às mudanças de fase.

2.3.1 Regime Permanente

Um novo conjunto de hipóteses úteis para o estudo do forno que se pretende investigar pode ser considerado a partir de agora. Quando o volume de controle não se move em relação ao sistema de coordenadas, as propriedades da substância, em cada ponto do volume de controle, não variam com o tempo e o fluxo de massa assim como as taxas nas quais o calor e trabalho atravessam a superfície de controle são constantes, tem-se (VAN WYLEN; BORGNAKKE; SONNTAG, 2003):

$$\frac{dm_{V.C.}}{dt} = 0 \qquad \frac{dE_{V.C.}}{dt} = 0$$

Nessas condições o processo está em regime permanente, e as Eqs. 1 e 2 podem ser escritas como a equação da continuidade (Eq. 3) e a primeira lei da Termodinâmica para regime permanente (Eq. 4):

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \qquad (3)$$

$$\dot{Q}_{V.C.} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e \right) = \dot{W}_{V.C.} + \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + gZ_s \right) \qquad (4)$$

Uma última simplificação (Eq. 5) pode ser sugerida para o caso de um fluido sem mudança de fase e com variações desprezíveis de energia cinética e potencial, pressão, trabalho e dissipação viscosa:

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_s - T_e) \qquad (5)$$

O lado direito da Eq. 5 representa a taxa líquida de saída de entalpia para um gás ideal ou fluido incompressível (INCROPERA et al., 2014).

2.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Para a finalidade deste estudo, apenas os mecanismos de transferência de calor relacionados à perda de energia através das paredes são considerados. O estudo e caracterização dos mecanismos de transferência de calor, que representam a troca de energia entre o jato de plasma e as superfícies internas do forno, não são essenciais para o balanço global de energia (TOULOUEVSKI; ZINUROV, 2013).

2.4.1 Condução

Quando existir um gradiente de temperatura em um meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido, utiliza-se o termo condução (ou difusão) para a transferência de calor que ocorrerá através do meio. Processos de transferência de calor podem ser quantificados através de equações de taxa apropriadas. Para a condução térmica, a equação dessa taxa é conhecida como lei de Fourier (INCROPERA et al., 2014). Para uma parede plana unidimensional pode-se expressar a taxa de transferência de calor conforme Eq. 6:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

Sendo k a condutividade térmica, uma propriedade intrínseca do material. O sinal negativo representa o sentido da transferência de calor, da região de maior temperatura para a de menor temperatura.

O fluxo térmico é a taxa de transferência de calor por unidade de área perpendicular à direção da transferência de calor. Reconhecendo que se trata de uma grandeza vetorial, pode-se escrever um enunciado mais geral da lei de Fourier como na Eq. 7:

$$\mathbf{q}'' = -k \left(\mathbf{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (7)$$

A razão entre a condutividade térmica e a capacidade térmica volumétrica é uma importante propriedade chamada difusividade térmica. A capacidade térmica volumétrica é o produto do calor específico e da massa específica. Assim a difusividade térmica é dada pela Eq. 8:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (8)$$

A difusividade térmica mede a capacidade de um material conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la. Definida tal propriedade, pode-se escrever de uma forma geral, em coordenadas cartesianas, a equação da difusão térmica, conforme Eq. 9:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

A Eq. 9, também conhecida como equação do calor, constitui a ferramenta básica para a análise de condução de calor. Através dela é possível obter a distribuição espacial de temperaturas em um meio estacionário em função do tempo. Frequentemente pode-se trabalhar com simplificações da Eq. 9. Para regime estacionário, sem geração de calor, a equação da difusão térmica se reduz a Eq. 10:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (10)$$

A solução adequada da Eq. 9 depende da definição correta das condições existentes no meio, em algum instante inicial. Tais condições são conhecidas como de fronteiras ou de contorno. Os três tipos de condição de contorno usualmente encontrados são:

- temperatura superficial constante: $T(0, t) = T_s$
- fluxo térmico constante na superfície: $-k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = q''_s$
- condição de convecção na superfície: $-k(\partial T / \partial x) = h(T_\infty - T(0, t))$

2.4.2 Convecção

A transferência de calor por convecção é a combinação de dois mecanismos. O calor é transferido através do movimento molecular aleatório (difusão), e através do movimento

global do fluido (advecção). Assim, o escoamento de um fluido sobre uma superfície, na presença de um gradiente de temperatura, constitui a convecção (INCROPERA et al., 2014).

A convecção pode ser classificada segundo sua natureza. Refere-se à convecção forçada quando causada por meios externos, como um ventilador; e convecção natural ou livre, quando induzida por forças de empuxo originadas a partir da existência de gradientes de massa específica.

Independente da natureza do processo de transferência de calor por convecção, a equação do fluxo de calor, conhecida como lei do resfriamento de Newton, possui a forma da Eq. 11:

$$q'' = h(T_{sup} - T_{\infty}) \quad (11)$$

O parâmetro h é conhecido como coeficiente de transferência de calor por convecção ou coeficiente de película. Ele depende da natureza do processo convectivo, da geometria da superfície e de outras propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido. Basicamente, o estudo da convecção constitui na determinação desse coeficiente (INCROPERA et al., 2014). Como o fluxo térmico e o coeficiente de película variam ao longo de uma superfície, a taxa total de transferência de calor pode ser obtida pela integração da Eq. 11, agora definida como fluxo de calor local ao longo da superfície, como demonstrado pela Eq. 12.

$$q = \int_A q'' dA = (T_{sup} - T_{\infty}) \int_A h dA \quad (12)$$

Definindo um coeficiente de convecção médio \bar{h} para toda a superfície, a taxa de transferência de calor total é dada pela Eq. 13:

$$q = \bar{h}A(T_{sup} - T_{\infty}) \quad (13)$$

Assim, igualando as Eqs. 12 e 13 pode-se definir a Eq. 14 que relaciona o coeficiente local e o coeficiente médio:

$$\bar{h} = \frac{1}{A} \int_A h dA \quad (14)$$

2.4.2.1 Convecção Natural

A convecção natural ocorre devido às forças de empuxo no interior do fluido. Esse empuxo está relacionado à presença de um gradiente de massa específica no fluido e de uma força de corpo proporcional à massa específica. Em geral a força de corpo é a gravitacional, e o gradiente de massa específica usualmente está associado a um gradiente de temperatura (INCROPERA et al., 2014).

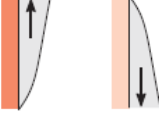
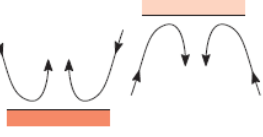
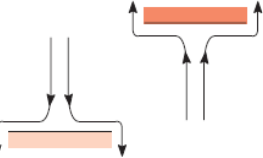
Para exemplificar tal fenômeno, considera-se uma placa horizontal com a superfície aquecida voltada para cima, e a temperatura da superfície maior que a do fluido. O fluido mais próximo à placa troca calor com esta por difusão, e sua massa específica diminui. A força gravitacional no fluido mais denso, mais distante da placa, excede aquela que atua no fluido mais leve nas camadas inferiores, empurrando-o para baixo, e certo padrão de circulação será estabelecido. O fluido mais pesado descerá, sendo aquecido durante o processo, e o mais leve subirá, resfriando durante o processo. No caso da superfície aquecida virada para baixo, o fluido próximo à placa, menos denso, permanece estável nas regiões superiores e a troca de calor será predominantemente difusiva (INCROPERA et al., 2014).

A convecção natural atua nas superfícies externas do forno, e é imprescindível para o cálculo de perdas de calor através de suas paredes. O coeficiente de convecção médio pode ser obtido a partir do número de Nusselt médio, através da Eq. 15.

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k} \quad (15)$$

A Eq. 15 representa a razão entre as transferências de calor por convecção e condução, e L é o comprimento característico, o qual depende da geometria da superfície. O Quadro 1 apresenta um resumo das relações empíricas para determinação do coeficiente de convecção natural de interesse para este trabalho.

Quadro 1– Resumo de correlações empíricas para a convecção natural.

Geometria	Correlação Recomendada	Restrições
1. Placas verticais 	$\overline{Nu} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$	Nenhuma
2. Placas horizontais		
(a) Superfície quente para cima ou fria para baixo 	$\overline{Nu} = 0,54 Ra^{1/4}$	$10^4 \lesssim Ra \lesssim 10^7$ $Pr \gtrsim 0,7$
(b) Superfície fria para cima ou quente para baixo 	$\overline{Nu} = 0,52 Ra^{1/5}$	$10^4 \lesssim Ra \lesssim 10^9$ $Pr \gtrsim 0,7$

Fonte: Adaptado de (INCROPERA et al., 2014).

O número de Rayleigh (Ra) é o parâmetro adimensional associado aos escoamentos produzidos por forças de empuxo, e definido pela Eq. 16:

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\alpha\nu} \quad (16)$$

Sendo α a difusividade térmica (m^2/s), β o coeficiente de expansão térmico ($1/K$) e ν a viscosidade cinemática (m^2/s). Para placas verticais o comprimento característico L é igual à altura da placa, e para placas horizontais é definido como a razão entre a área e o perímetro da placa.

2.5 CRITÉRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA FORNOS ELÉTRICOS

A eficiência de fornos elétricos a arco pode ser definido como a razão entre a energia útil e o consumo total de energia do forno, conforme Eq. 17 (TOULOUEVSKI; ZINUROV, 2013):

$$\eta = \frac{E_{\acute{u}til}}{E_{total}} \quad (17)$$

A energia útil, ou seja, a energia efetivamente transferida para o processo de vitrificação resulta da diferença entre a energia total consumida e as perdas de energia do forno. O forno perde energia principalmente por condução através das paredes e pelos gases de exaustão. Todos esses valores são obtidos através do balanço de energia do forno (TOULOUEVSKI; ZINUROV, 2013). A determinação da eficiência é um ponto importante do estudo de fornos que utilizam energia elétrica, uma vez que em muitos países trata-se de um tipo custoso de energia e sua geração pode ser afetada por fatores climáticos, como no caso do Brasil.

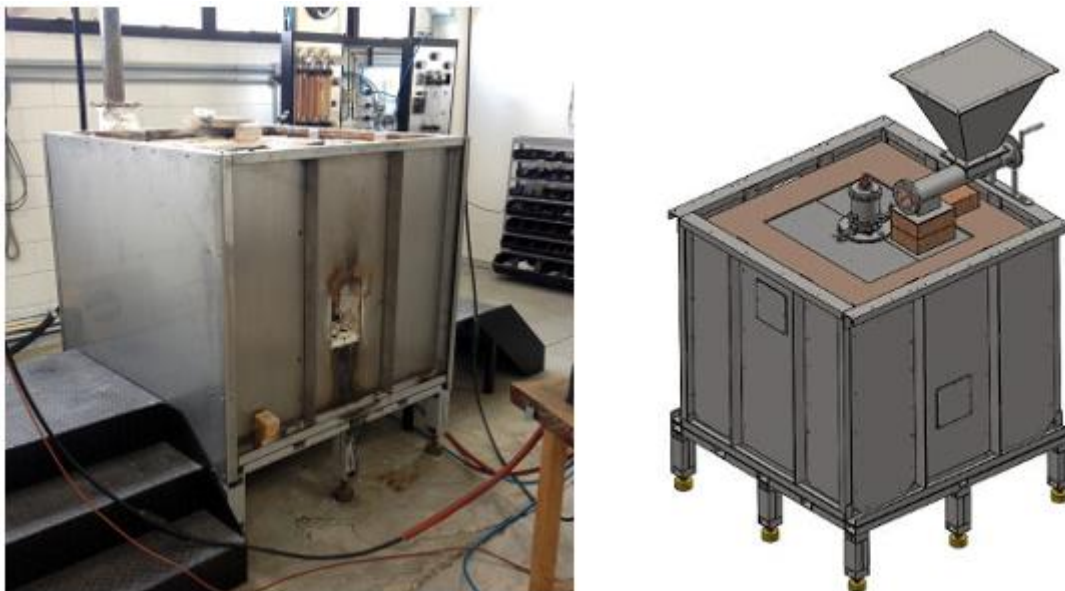
3 METODOLOGIA

3.1 FORNO

O forno, que é o objeto deste estudo, está situado na Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), na cidade de São José dos Campos, no estado de São Paulo. Os ensaios do forno são realizados no laboratório do projeto Vitrisol. O projeto tem como objetivo desenvolver tecnologias para vitrificação de cinzas volantes perigosas, resultantes de usinas de incineração, empregando plasma térmico. Essas cinzas concentram a maior parte dos metais pesados, dioxinas e furanos e outros contaminantes que conferem caráter perigoso ao resíduo.

Na fase atual de desenvolvimento do forno, as cinzas de incineradores foram substituídas por cinzas de bagaço de cana, uma vez que são de fácil manuseio, e dispensam o tratamento do efluente gasoso gerado durante a vitrificação. Anseia-se que, na fase de testes, o forno seja capaz de processar 50 kg/h de cinzas. O forno é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Forno empregado para vitrificação de cinzas, laboratório Vitrisol.



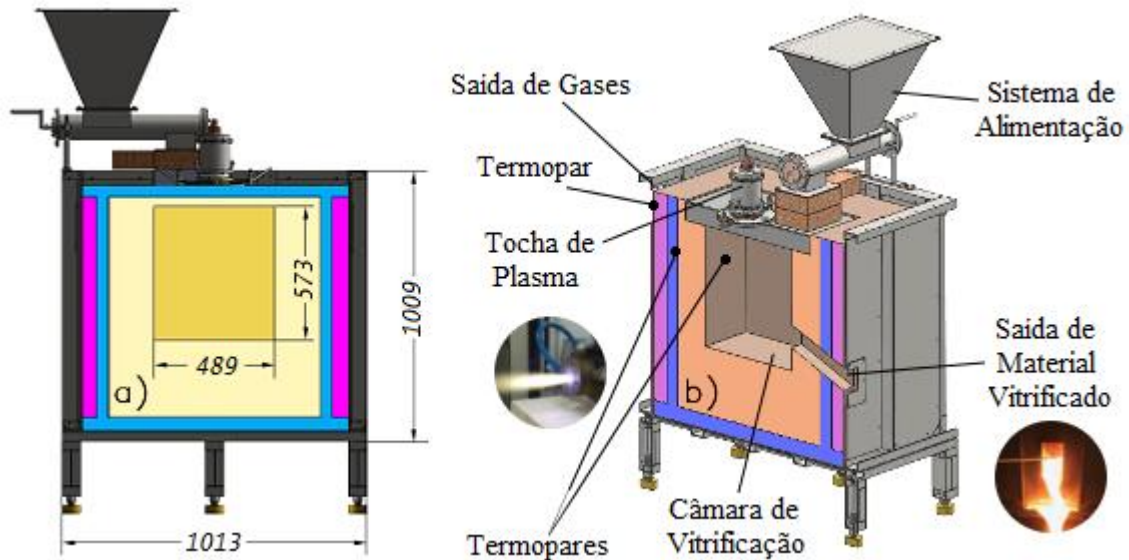
Fonte: produção do autor; fornecido pela equipe do projeto Vitrisol.

3.1.1 Características

O forno possui um sistema de alimentação, uma câmara de vitrificação, uma tocha de plasma, uma saída para gases, uma saída para o material vitrificado, alguns sensores

(termopares) e um sistema de controle. As dimensões gerais do forno são apresentadas na Figura 8-a. As localizações dos componentes anteriormente citados são representadas na Figura 8-b.

Figura 8 – a) Dimensões do forno; b) Componentes do forno (dimensões em milímetros).



Fonte: fornecido pela equipe do projeto Vitrisol e adaptado pelo autor.

O sistema de alimentação é constituído por um fuso mecânico, acionado por motor elétrico, e está localizado no topo do forno. Esse sistema é inicializado quando o período de aquecimento é finalizado. O forno é aquecido até que a temperatura em seu interior atinja 1600 °C.

A tocha está localizada no centro da parede superior do forno. Por se tratar de uma tocha de arco não transferido, o jato de plasma não entra em contato direto com as cinzas. Sendo assim, a transferência de calor para a câmara de vitrificação se dá por meio de radiação e convecção.

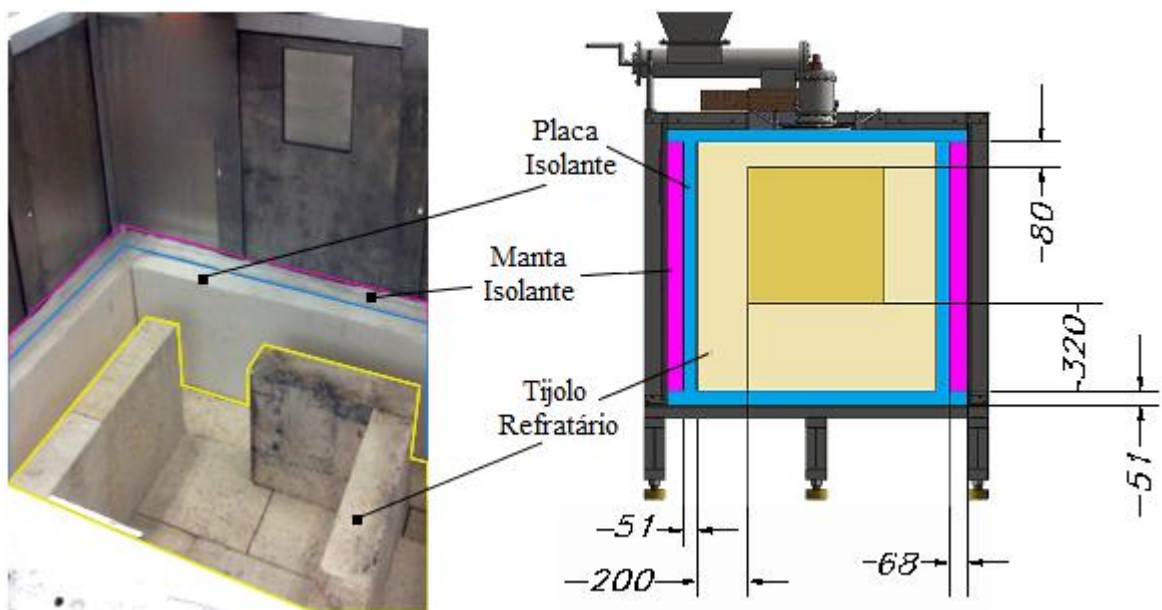
A saída de gases está localizada em uma das laterais na parte superior, e o material vitrificado é recolhido em outra das laterais na parte inferior. Os termopares medem as temperaturas no interior do forno e entre os materiais que compõem as paredes do forno. Existe ainda um sensor responsável por medir a temperatura dos gases de exaustão.

O forno e seus componentes periféricos são controlados a partir de uma central, que faz a aquisição dos dados durante os ensaios. Os dados são exibidos em um monitor, para que os operadores verifiquem a regularidade do sistema, e são convertidos em arquivos no formato de planilha.

3.1.2 Materiais e Sistemas de Isolamento

As paredes do forno são compostas por uma camada de tijolo refratário que suporta temperaturas elevadas, por camadas de placa isolante e de manta isolante, além de uma chapa de aço inoxidável que forma a estrutura. As espessuras e disposição de cada uma dessas camadas estão esquematizadas na Figura 9.

Figura 9 – Composição das paredes do forno (dimensões em milímetros).



Fonte: fornecido pela equipe do projeto Vitrisol e adaptado pelo autor.

3.1.2.1 Tijolo Refratário

Os tijolos refratários utilizados no forno são genericamente conhecidos como *sillimanite brick* ou “tijolo de silimanita”. A silimanita é um mineral polimorfo de aluminossilicato, juntamente com a cianita e a andalusita. O tijolo de silimanita é um tipo de refratário denso, de elevada resistência a altas temperaturas e à corrosão. Sua composição consiste principalmente em Al_2O_3 e SiO_2 com adição de uma pequena quantidade de Fe_2O_3 . Esse tijolo é muito resistente à escória de vidro e, portanto, amplamente utilizado como material de revestimento de fornos para fusão de vidro. Também é comumente empregado na indústria de cimento e da reciclagem térmica, para processos com mudanças bruscas de temperatura, em incineradores de biomassa e em fornos de cerâmica (SUNRISE, 2015).

A Tabela 1 apresenta um resumo das principais características do tijolo utilizado.

Tabela 1 – Composição e principais propriedades do tijolo refratário (*sillimanite*).

Composição Química (% por massa)		
Al ₂ O ₃	61	
SiO ₂	36	
Fe ₂ O ₃	0,9	
CaO	0,2	
MgO	0,4	
TiO ₂	0,4	
K ₂ O	0,4	
Na ₂ O	0,2	
Características Físicas		
Massa Específica	2500	kg/m ³
Temperatura de operação	1600	°C
Condutividade térmica		
400 °C	1,45	W/m K
700 °C	1,50	
1100 °C	1,65	

Fonte: Adaptado de (SAINT-GOBAIN, 2003).

3.1.2.2 Placa Isolante

A placa isolante utilizada no forno é comercializada como “placa *Duraboard*[®] RK”. É uma placa rígida destinada a aplicações em temperaturas elevadas, produzida com flocos de fibra cerâmica. Entre as características da placa pode-se destacar a baixa condutividade térmica, estabilidade em condições de alta temperatura, excelente resistência ao choque térmico e ao ataque químico. A placa é leve e livre de amianto, podendo ser facilmente serrada, furada ou usinada. Geralmente empregada para cobertura e isolamento de transporte de metal líquido, revestimento de dutos de gases quentes, isolamento complementar para refratários densos, revestimento de face quente em fornos e chaminés e como substituição ao amianto (UNIFRAX, 2001).

A Tabela 2 apresenta um resumo das principais características da placa utilizada.

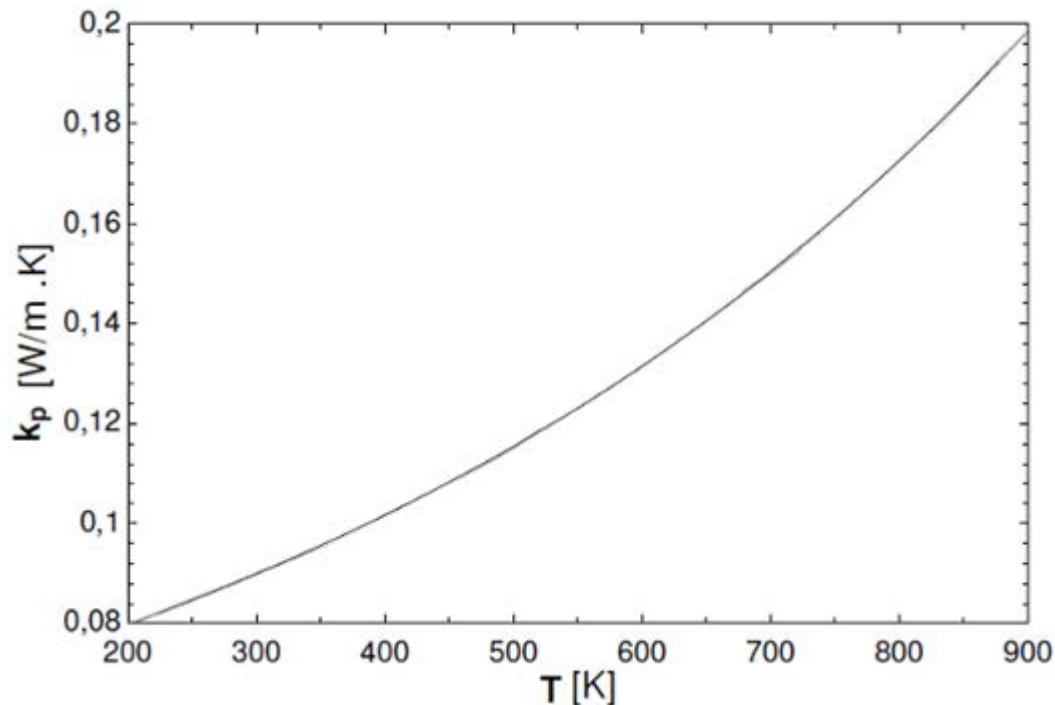
Tabela 2 – Composição e principais propriedades da placa isolante.

Características Físicas		
Composição	Alumina, Sílica	-
Temperatura de operação	1260	°C
Massa Específica	400	kg/m ³

Fonte: Adaptado de (UNIFRAX, 2001).

A Figura 10 apresenta a variação dos valores de condutividade térmica da placa com a temperatura.

Figura 10 – Condutividade térmica da placa isolante.



Fonte: Adaptado de (UNIFRAX, 2001).

3.1.2.3 Manta Isolante

A manta isolante empregada no forno, nome comercial “fibra moída *Fiberfrax*®”, é composta por flocos de fibras cerâmicas moídas. Assim como a placa isolante, possui boa estabilidade em elevadas temperaturas, baixa condutividade térmica, excelente resistência ao choque térmico e ataque químico, e é livre de amianto. Esse tipo de manta é empregada para selagem refratária e em juntas de dilatação (UNIFRAX, 2000).

A Tabela 3 apresenta um resumo das principais características da manta utilizada.

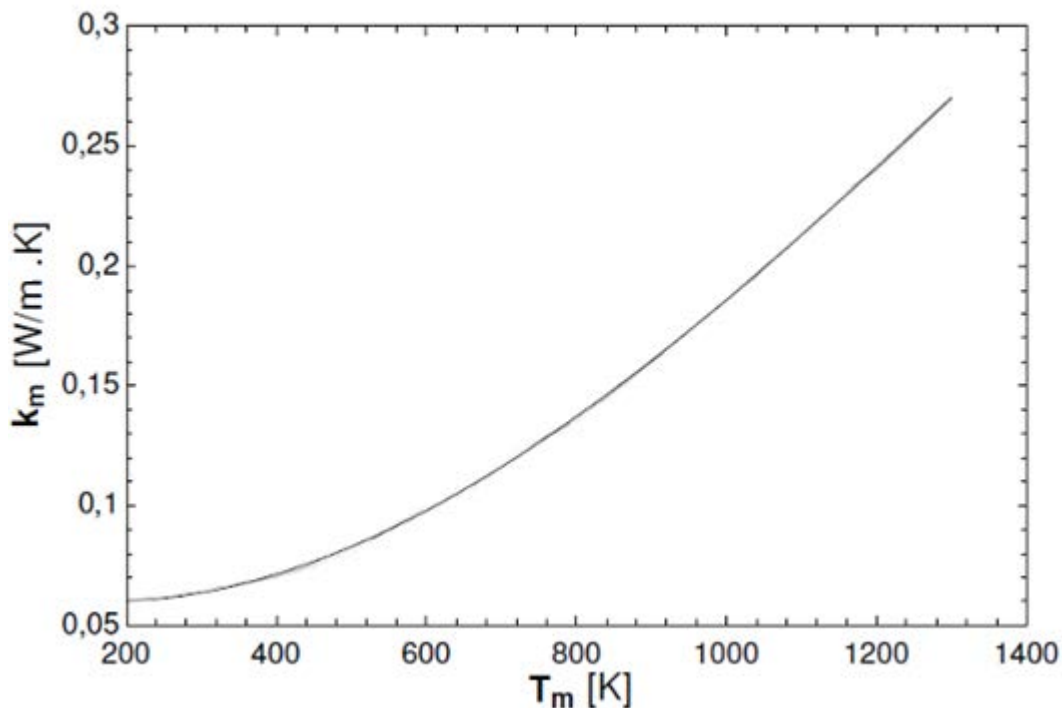
Tabela 3 – Composição e principais propriedades da manta isolante.

Características Físicas		
Composição	Alumina, Sílica	-
Temperatura de operação	1260	°C
Massa Específica	2730	kg/m ³

Fonte: Adaptado de (UNIFRAX, 2000).

A Figura 11 apresenta a variação dos valores de condutividade térmica da manta com a temperatura.

Figura 11 – Condutividade térmica da manta isolante.



Fonte: Adaptado de (UNIFRAX, 2000).

3.1.2.4 Aço Inoxidável

A estrutura do forno foi fabricada com aço AISI 304, que é uma liga de aço cromo-níquel (18% de cromo e 8% de níquel) austenítica. Alguns aços inoxidáveis são frequentemente utilizados a elevadas temperaturas e em ambientes severos, porque resistem à oxidação e mantêm sua integridade mecânica sob tais condições. Assim, este tipo de aço é comumente empregado em turbinas a gás, caldeiras de vapor de alta temperatura, fornos de

tratamento térmico, aeronaves, mísseis e unidades de geração de potência nuclear (CALLISTER, 2012). A Tabela 5 apresenta um resumo das principais características do aço utilizado.

Tabela 4 – Principais propriedades do aço inoxidável.

Características Físicas		
Ponto de Fusão	1397	°C
Massa Específica	7900	kg/m ³
Conductividade Térmica		
400 °C	16,6	W/m K
700 °C	21,2	
1200 °C	28,0	

Fonte: Adaptado de (INCROPERA et al., 2014).

3.2 TOCHA DE PLASMA

A tocha de plasma estudada faz uso de corrente contínua e possui arco não transferido, utilizando a configuração de eletrodos frios. Os eletrodos são cilíndricos, coaxiais e fabricados em cobre, separados por um interstício por onde é injetado o fluido de trabalho com movimento de vórtice. Considera-se que a energia é dissipada exclusivamente pelo sistema de resfriamento, e o restante é convertido em energia térmica por meio do plasma, conferindo uma eficiência térmica de 80% ao dispositivo.

Neste caso o fluido de trabalho injetado na tocha é uma mistura de 96% em massa de ar atmosférico comprimido, a uma pressão de 450 kPa, e 4 % em massa de gás natural, totalizando uma vazão mássica de 0,00627 kg/s. A mistura é realizada previamente, e em seguida injetada na tocha em uma pré-câmara. Neste momento, os gases são direcionados para uma peça denominada anel de vórtice, cuja finalidade é fazer com que o escoamento adquira grande velocidade angular à medida que é direcionado para o interior dos eletrodos. A utilização do gás natural tem como objetivo aumentar a quantidade de energia fornecida pela tocha e, conseqüentemente, seu rendimento. O plasma gerado a partir dessa mistura pode ser visto na Figura 12.

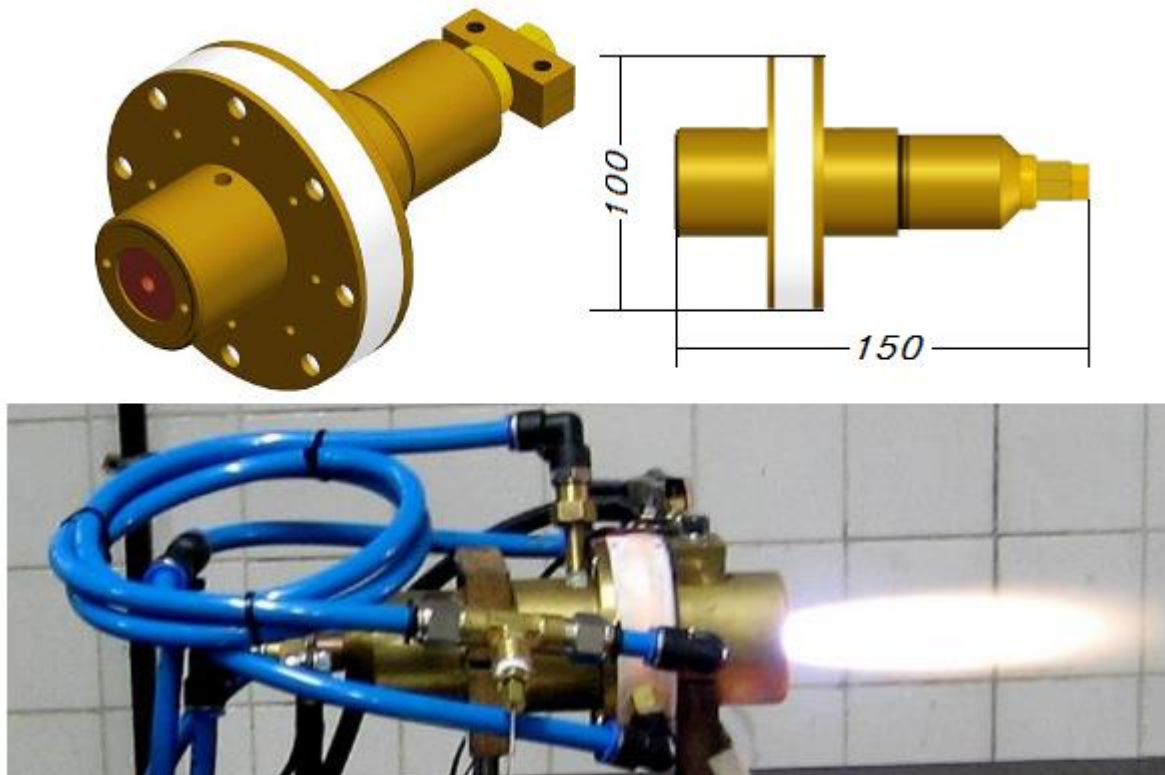
Figura 12 – Plasma gerado com mistura de ar e gás natural por tocha utilizada no estudo.



Fonte: fornecido pela equipe do projeto Vitrisol.

A tocha de plasma é operada com uma tensão de 500 V e uma corrente de 90 A, totalizando um consumo de 45 kW. Essa potência é aplicada nos eletrodos, e por meio da interação do campo elétrico com a mistura gasosa, esta é ionizada gerando o jato de plasma. Os detalhes da tocha em questão podem ser observados na Figura 13.

Figura 13 – Detalhes da tocha empregada no forno estudado (dimensões em milímetros).



Fonte: fornecido pela equipe do projeto Vitrisol.

O sistema de resfriamento, cuja finalidade é retirar calor dos eletrodos para evitar sua fusão, utiliza água a uma vazão de 0,16 kg/s. A água é bombeada em temperatura ambiente para a tocha, aumentando em 10 °C sua temperatura após sair do dispositivo. Posteriormente, a água é encaminhada para uma torre de resfriamento.

3.3 CINZAS DE BAGAÇO DE CANA

O bagaço de cana-de-açúcar é o resíduo produzido nas usinas após a extração do caldo. O excedente do bagaço é usualmente queimado para gerar parte da energia elétrica consumida nas plantas de produção de açúcar e na destilação do álcool. As cinzas são resíduos da combustão do bagaço, compostas de óxidos que se apresentam normalmente em estado sólido à temperatura ambiente (LENÇO, 2010). A Figura 14-a mostra o bagaço de cana e a Figura 14-b a cinza do bagaço de cana.

Figura 14 – a) Bagaço de cana; b) cinza de bagaço de cana.



Fonte: (ASSET SERVICE COMMODITIES, 2015); (KIRAN; KIRAN, 2013).

Como a cinza de bagaço de cana é um material higroscópico, é necessário avaliar seu grau de umidade. Experimentos anteriores, realizando a pesagem da cinza antes e após a secagem em uma estufa durante 24 horas, indicaram que a percentagem média em massa de água nas cinzas é 50 %.

Segundo Cortez e Gómez (1997), o calor específico das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar é igual a 0,836 kJ/kgK.

3.4 SIMULAÇÃO DO FORNO

Após a consolidação da base teórica, foi realizada uma simulação numérica por intermédio do programa ANSYS® *Workbench*TM 16.2, utilizando um pacote introdutório para estudantes (versão acadêmica) com limitação de 32000 nós/elementos para modelos estruturais. Utilizou-se como solver o *Mechanical*TM integrado ao *Workbench*TM, selecionando o modelo térmico em estado estacionário (*steady-state thermal*). Para a modelagem dos sólidos foi utilizado o *Design Modeler*TM e para geração da malha, o *Meshing*TM.

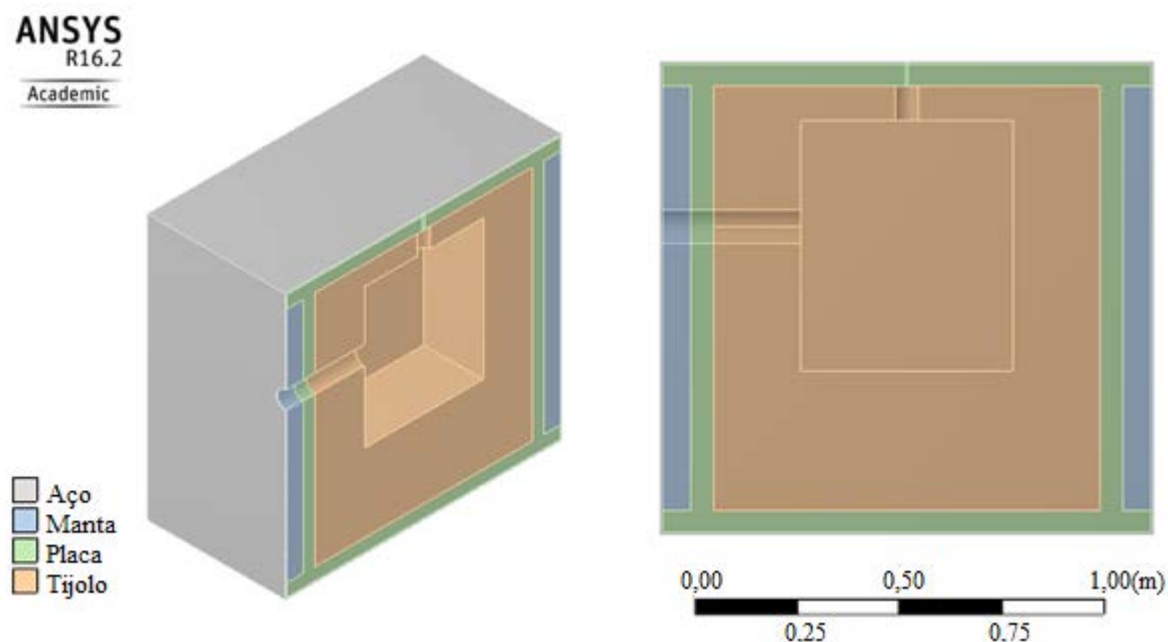
A análise de elementos finitos tem como objetivo definir as perdas de energia (na forma de calor) que ocorrem através das paredes do forno. O modelo geométrico considera um forno cúbico, cortado em seu eixo de simetria, a fim de gerar uma malha tão refinada quanto possível e reduzir o tempo de processamento da solução. Nas superfícies internas das paredes, foi imposto um valor constante de temperatura pré-definido pelo projeto, e nas superfícies externas convecção natural.

3.4.1 Simulação Numérica do Forno

O primeiro passo foi a criação dos materiais que compõem as paredes do forno na biblioteca do ANSYS®, *Engineering Data*TM. Como o modelo está em estado estacionário e sem geração de energia, a equação da difusão térmica (Eq. 9) se reduz à Eq. 10. Destarte, apenas a condutividade térmica de cada material precisa ser definida para resolução do problema. As variações da condutividade em relação à temperatura foram inseridas no *software* conforme as seções 3.1.2.1 até 3.1.2.4. Dessa forma, puderam-se variar os valores de condutividade com a temperatura, para cada material, durante a resolução do modelo.

Em seguida, foi criada a geometria no *Design Modeler*TM, sendo o forno modelado como uma cavidade cúbica fechada, respeitando as espessuras das camadas de materiais refratários e isolantes utilizados. Não faz parte do escopo deste trabalho determinar como ocorreram as trocas de calor para as paredes, apenas o fluxo térmico que as atravessa. Portanto, não foi criado, geometricamente, nenhum modelo para os gases dentro do forno. A Figura 15 mostra a geometria do forno com o corte em seu eixo de simetria. Trabalhando apenas com metade do forno, foi possível refinar de forma apropriada a malha gerada posteriormente. Os furos de entrada e saída dos gases foram mantidos.

Figura 15 – Geometria simplificada do forno.



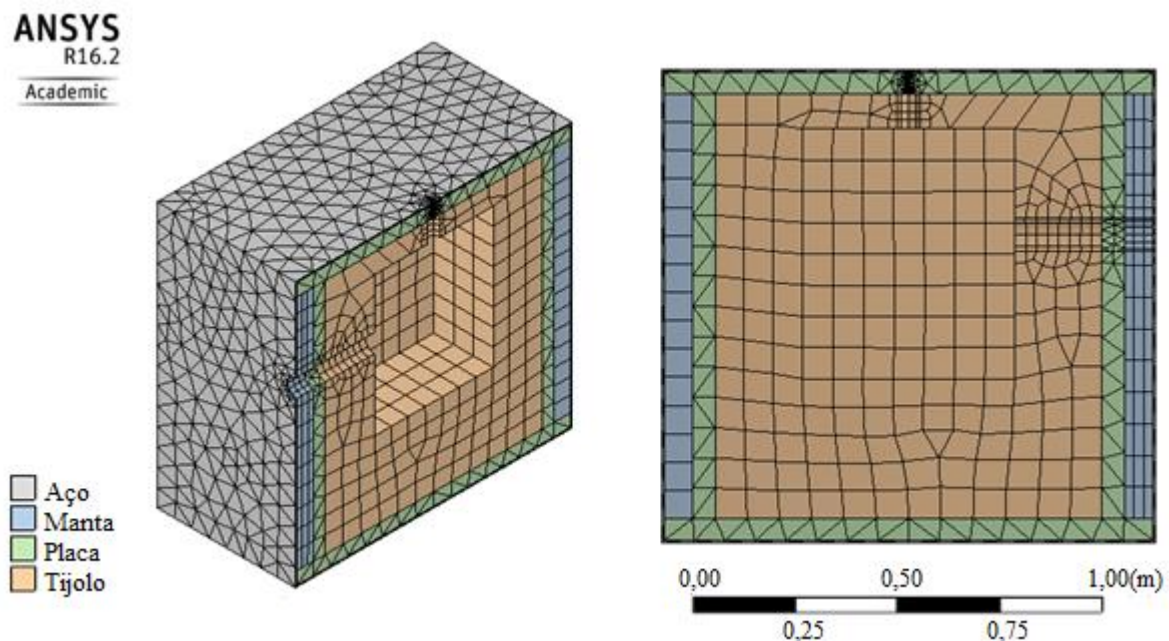
Fonte: produção do autor.

A próxima etapa foi a geração da malha com o recurso *Meshing*TM. Foram selecionadas malhas hexaédricas para os volumes mais simples e de maior espessura, como os constituídos pela manta e os tijolos refratários. Para os volumes compostos pelo aço e pela placa isolante, se manteve a malha tetraédrica, gerada automaticamente pelo programa. Tendo em vista as limitações impostas pela versão acadêmica do *software*, foi criada uma malha base com as seguintes definições:

- *Physics Preference: Mechanical* – define os controles básicos da malha de acordo com o tipo de problema físico a ser estudado.
- *Use Advanced Size Function: On Curvature* – analisa curvas em arestas e faces e seleciona elementos que não violam o tamanho máximo ou os ângulos de curvatura.
- *Relevance Center: Coarse* – define o ponto médio da medida de refinamento (*relevance*) da malha.
- *Mesh Method: Patch Tetraedrons* – malha formada por tetraedros.
- *Mesh Method: Multizone* – malha formada por hexaedros nas regiões que permitem tal decomposição, e malha livre nas demais regiões.
- *Mesh Method: Hex Dominant* – malha formada principalmente por hexaedros.

Na malha com as definições referidas, observou-se que o software selecionou os tetraedros e hexaedros de acordo com a espessura e formato de cada volume, e da proximidade dos furos. Foram realizadas algumas simulações para constatar até que ponto era preciso elevar o grau de refinamento da malha (*relevance*). Uma malha fina é mais precisa, no entanto, usa mais elementos, mais tempo de processamento, e finalmente, mais recursos do sistema. Embora mudanças pouco significativas nos resultados fossem observadas, manteve-se o refinamento máximo possível que respeita o número de elementos permitido pela versão acadêmica, definindo o grau de refinamento igual a 27 (valores próximos de +100 estão relacionados a uma maior precisão enquanto valores próximos de -100 representam maior velocidade de processamento) e um *span angle center* médio. O *span angle center* estabelece limites para o refinamento da malha baseados em curvatura. A malha refinada possui 31188 nós (Figura 16).

Figura 16 – Malha gerada para o modelo.



Fonte: produção do autor.

Finalmente, configurou-se o solver, *Mechanical*TM, responsável pelos cálculos. A opção *Nonlinear Effects* foi mantida ativa em cada volume da geometria, para que as propriedades dos materiais, no caso a condutividade, variassem com a temperatura (ANSYS, 2013).

A temperatura das superfícies internas das paredes foi definida como uniforme, constante e igual a 1600 °C (temperatura de operação do forno). As temperaturas iniciais, bem

como a temperatura do ar ao redor do forno, foram consideradas como 25 °C. Nas superfícies externas das paredes, se estabeleceu a condição de convecção natural.

Os coeficientes de convecção variam de acordo com a temperatura média de filme, definida como a média da temperatura da superfície e do fluido quiescente. Quando os coeficientes de película dependem da temperatura, o ANSYS® oferece a utilização do recurso *table*, que permite especificar uma tabela de temperaturas em ordem crescente, juntamente com os correspondentes valores do coeficiente de película em cada temperatura. Os coeficientes foram calculados com as correlações apropriadas para paredes horizontais, com superfície quente voltada para cima ou para baixo, e paredes verticais. As variações dos coeficientes de convecção foram tabeladas de acordo com a temperatura de filme com os recursos apropriados do *software Engineer Equation Solver* (EES), conforme item 3.4.2.

As condições de fronteira e modelo térmico adotados estão resumidos no Quadro 2.

Quadro 2 – Resumo do modelo numérico empregado.

Fenômeno	Modelo Numérico
Modelo Térmico	Estacionário
Simetria	Eixo Z
Temperatura Inicial	25°C
Temperatura	1600°C, Superfícies Internas
Convecção 1 Convecção 2 Convecção 3	Superfície Horizontal Superior Superfícies Verticais Superfície Horizontal Inferior
Coefficiente de Convecção	Valores Tabelados
Tipo de Coeficiente	Temperatura Média de Filme
Temperatura Ambiente	25°C
Variável Independente	Temperatura

Fonte: produção do autor.

3.4.2 Coeficientes de Convecção Natural

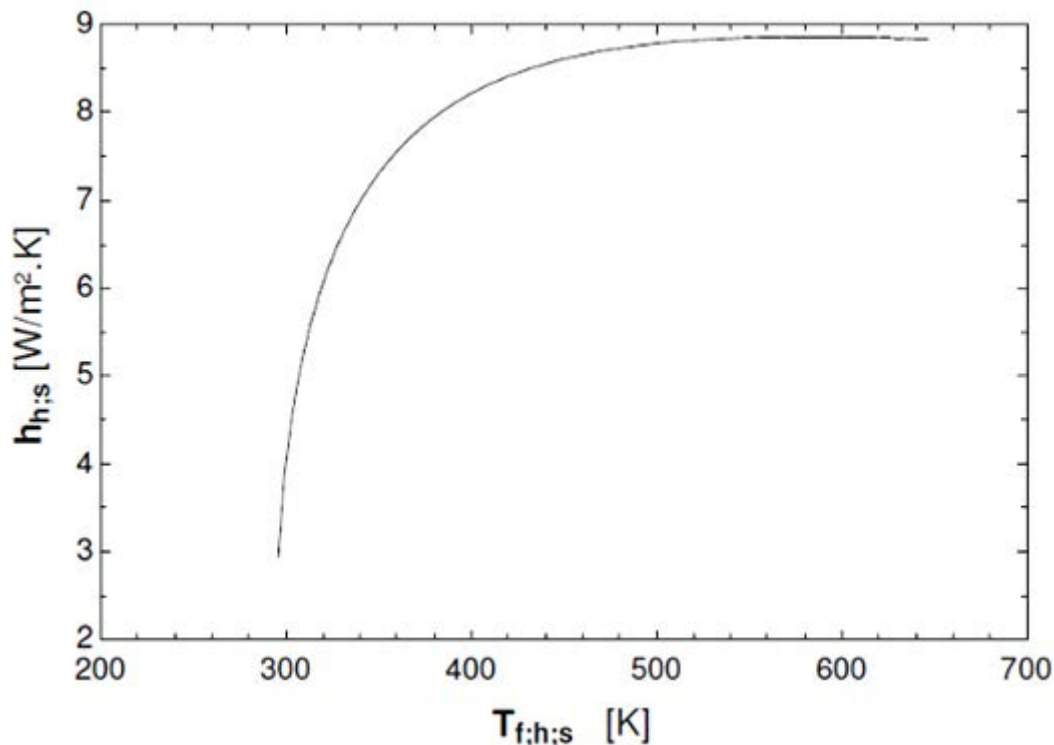
O EES é um software para resolução de equações algébricas, diferenciais e integrais, capaz de fornecer análises de incerteza, executar regressão linear e não linear, converter unidades, verificar propriedades termodinâmicas e gerar gráficos. O software possui várias

rotinas de cálculo pertinentes para a transferência de calor, inclusive para o cálculo de coeficientes de convecção natural para corpos de diversas geometrias.

Os coeficientes de convecção são calculados apenas especificando o fluido (ar) e fornecendo a temperatura da superfície e a temperatura do fluido. Como salientado anteriormente, são empregadas correlações para cada tipo de placa (horizontal com superfície quente para cima ou para baixo e vertical). Os valores encontrados foram comparados com os calculados através das correções apresentadas no Quadro 1, e todos se mostraram similares.

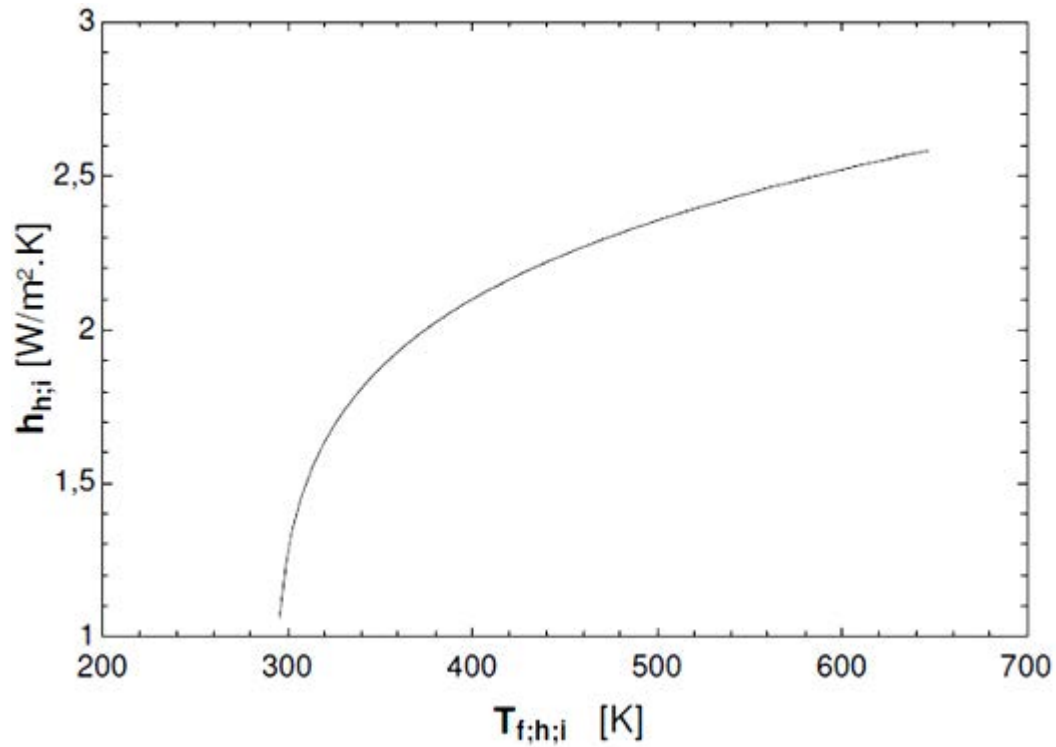
Como a temperatura superficial da parede é desconhecida, os coeficientes foram determinados com a variação desta, e conseqüente variação da temperatura de filme. Esses dados foram inseridos na simulação anterior, evitando a realização de iterações manuais para definição dos coeficientes. As curvas que relacionam a temperatura de filme e os coeficientes de convecção podem ser observadas nas Figuras 17, 18 e 19.

Figura 17 – Variação do coeficiente convectivo com a temperatura de filme para paredes horizontais, com a superfície aquecida voltada para cima.



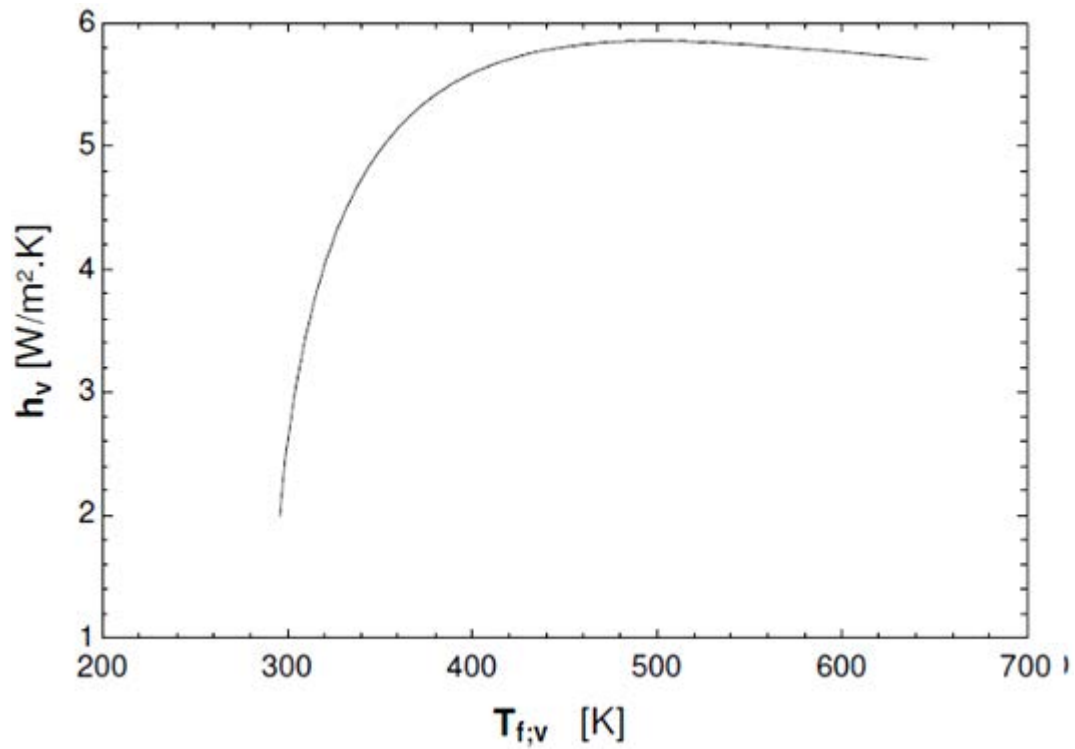
Fonte: produção do autor.

Figura 18 – Variação do coeficiente convectivo com a temperatura de filme para paredes horizontais, com a superfície aquecida voltada para baixo.



Fonte: produção do autor.

Figura 19– Variação do coeficiente convectivo com a temperatura de filme para paredes verticais.



Fonte: produção do autor.

3.5 BALANÇO DE ENERGIA

O balanço global de energia do forno foi dividido em duas partes. Na primeira, o volume de controle considerado é a tocha de plasma; na outra parte, o volume de controle é a totalidade do forno. Esta divisão tem como finalidade obter outros parâmetros a respeito do funcionamento do forno que seriam omitidos na realização de um único balanço de energia. O EES também foi utilizado para resolver as equações envolvidas, permitindo variar rapidamente os parâmetros e sondar estados de operação.

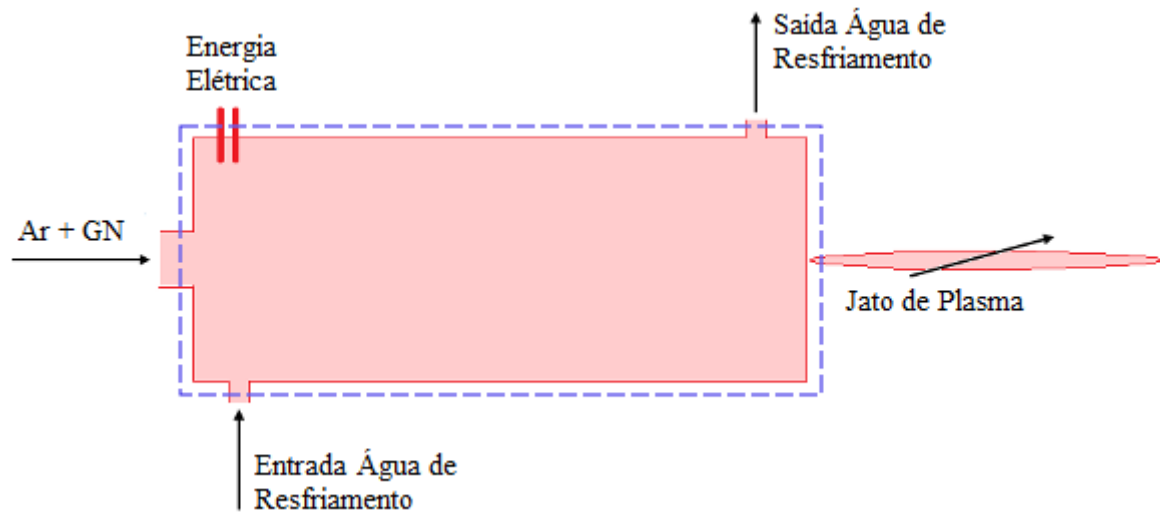
3.5.1 Balanço Global de Energia da Tocha

Considerando que a tocha de plasma não perde calor através de suas paredes (adiabática), e que a energia é dissipada exclusivamente pela água de resfriamento, pode-se escrever a equação do balanço de energia para a tocha conforme a Eq. 18:

$$P_{elet} + \dot{m}_{GN}PCI + \dot{m}_{ar}h_{ar} = (\dot{m} Cp \Delta T)_{ag} + (\dot{m}_{GN} + \dot{m}_{ar})h_{pl} \quad (18)$$

Do lado esquerdo da Eq. 18, a energia entra na tocha na forma de energia elétrica (potência elétrica, P_{elet}) e energia associada à queima do gás natural (vazão mássica de gás natural e poder calorífico inferior, $\dot{m}_{GN}PCI$). A água e o ar também cruzam o volume de controle, entrando na tocha (vazão mássica e entalpia do ar, $\dot{m}_{ar}h_{ar}$). Do lado direito, a energia é carregada para fora do volume de controle pela água de resfriamento (vazão mássica, calor específico e variação das temperaturas de entrada e saída da água, $(\dot{m} Cp \Delta T)_{ag}$), e o restante é convertido em energia térmica que se manifesta como o jato de plasma. O principal objetivo neste momento é a determinação da entalpia relacionada ao plasma (h_{pl}) e, conseqüentemente, a quantidade de energia disponibilizada para o forno. Esse valor é de grande relevância para os cálculos seguintes, uma vez que limita a quantidade de energia disponível para vitrificação. A partir da entalpia do plasma também é possível estimar a sua temperatura. A Figura 20 esquematiza as correntes de energia que entram e saem da tocha.

Figura 20 – Esquemática do balanço de energia na tocha de plasma.



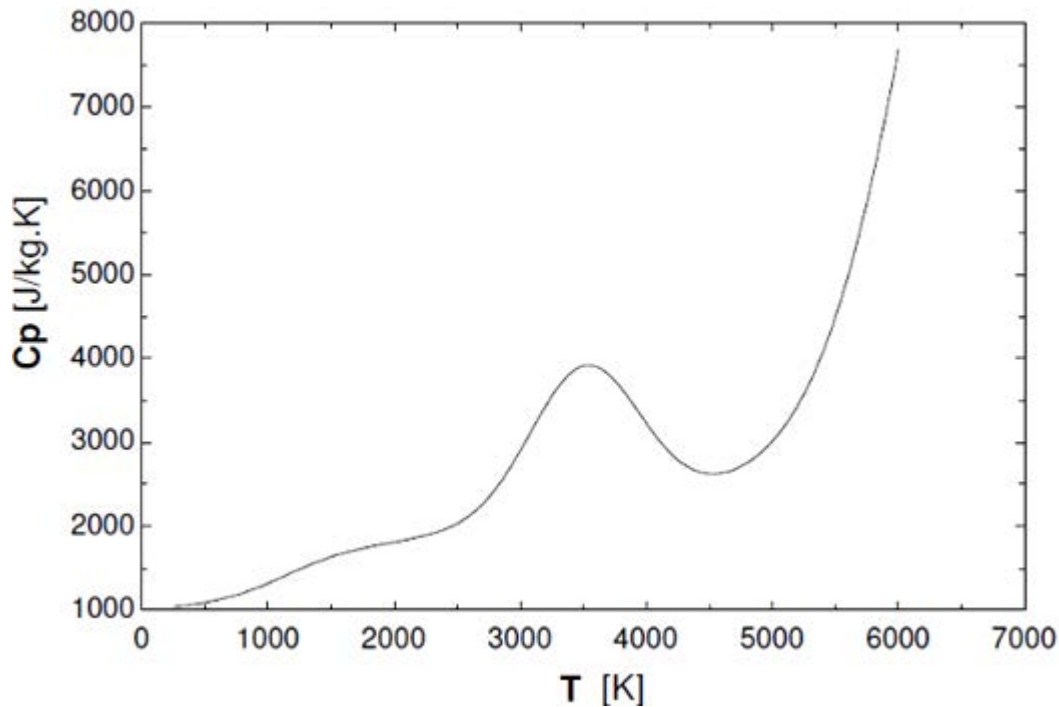
Fonte: produção do autor.

3.5.1.1 Temperatura do Plasma

A determinação da temperatura do plasma pode ser vista como um indicativo da conformidade dos resultados obtidos, uma vez que é possível compará-la com outros valores presentes na literatura. Ademais, tal determinação pode servir de base para trabalhos futuros.

D' Angola et al. (2007) apresentam expressões analíticas para propriedades termodinâmicas e coeficientes de transporte para plasma de ar, em uma ampla faixa de pressão (1,01 – 10132,5 kPa) e de temperatura (50 - 60000 K), prontas para serem utilizadas em *softwares* como o EES. Adotando essas expressões, a uma pressão de 101,32 kPa e um intervalo de temperatura de 200 – 6000 K, traçou-se a curva do calor específico do plasma, como observado na Figura 21.

Figura 21 – Variação do calor específico com a temperatura, para plasmas gerados a ar.



Fonte: produção do autor.

Aproximando a curva obtida para um polinômio, uma equação para o calor específico em função da temperatura foi escrita como na Eq. 19:

$$Cp = 369 + 2,9 T + 3,6 \cdot 10^{-2} T^2 + 2,0 \cdot 10^{-5} T^3 + 4,5 \cdot 10^{-10} T^4 + 3,5 \cdot 10^{-14} T^5 \quad (19)$$

De acordo com a primeira lei da Termodinâmica para gases perfeitos, e como exemplificado por Favalli e Szente (1998), os valores de temperatura, para o jato do plasma térmico, podem ser obtidos a partir da entalpia como na Eq. 20:

$$h_{pl} - h_{ref} = \int_{T_{ref}}^{T_{pl}} Cp dT \quad (20)$$

Os valores de entalpia (h_{ref}) e temperatura (T_{ref}) de referência são 298 kJ/kg e 25 °C, respectivamente. Integrando a Eq. 20 em relação à temperatura, e conhecendo o valor da entalpia do plasma, pode-se estabelecer a temperatura do plasma térmico.

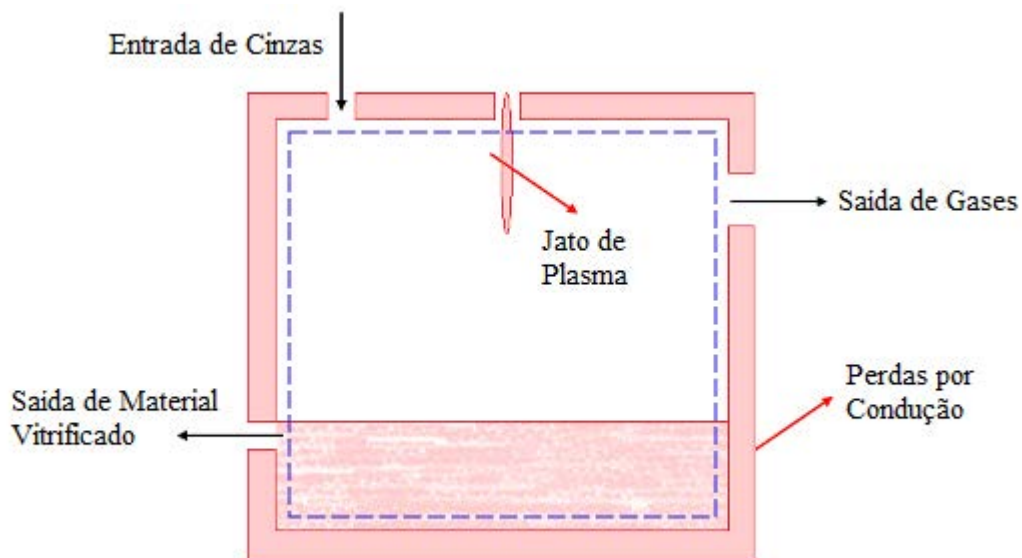
3.5.2 Balanço Global de Energia do Forno

O balanço global de energia no forno também foi realizada com auxílio do *software* EES. A energia de vitrificação (\dot{E}_{vt}), definida como a energia disponível para o processo de vitrificação, é igual à energia disponibilizada pelo plasma para o forno, menos as perdas de energia por condução (taxa de perda de calor por condução, q_{cond}) e pelos gases de exaustão. Durante os ensaios, constatou-se que a temperatura de saída dos gases (T_g) é de 1227 °C. O balanço global de energia no forno é expresso pela Eq. 21:

$$\dot{E}_{vt} = (\dot{m}_{GN} + \dot{m}_{ar})h_{pl} - q_{cond} - (\dot{m}_{GN} + \dot{m}_{ar})Cp_g(T_g - T_\infty) \quad (21)$$

A vazão mássica de gás natural é 0,00027 kg/s, e a de ar 0,006 kg/s. A Figura 22 esquematiza as taxas de energia que entram e saem do volume de controle definido para o forno.

Figura 22 – Esquemática do balanço de energia no forno.



Fonte: produção do autor.

Sabe-se que as cinzas de bagaço de cana retêm 50% em massa de umidade. Assim, a vazão de cinza úmida é composta por proporções iguais de água e cinza seca, conforme Eq. 22.

$$\dot{m}_{c,u} = 0,5 \dot{m}_c + 0,5 \dot{m}_{ag} \quad (22)$$

Na qual, $\dot{m}_{c,u}$ é a vazão mássica de cinza úmida e \dot{m}_c a vazão mássica cinza seca.

Para determinação da capacidade de processamento do forno, deve-se admitir que a energia disponível para a vitrificação seja, em parte, consumida pelo processo de aquecimento e vaporização da água presente nas cinzas. O restante da energia será consumido pelo processo de vitrificação propriamente dito. Tais considerações são expressas através da Eq. 23.

$$\dot{E}_{vt} = 0,5\dot{m}_{c,u}Cp_{ag}(T_{vap} - T_{ag}) + 0,5 \dot{m}_{c,u}h_{lv} + 0,5 \dot{m}_{c,u}Cp_c\Delta T_c \quad (23)$$

Na qual, T_{vap} e h_{lv} são a temperatura e entalpia de vaporização da água, respectivamente. Os subscritos c,u e c, indicam as vazões mássicas e propriedades de cinza úmida e cinza seca, respectivamente.

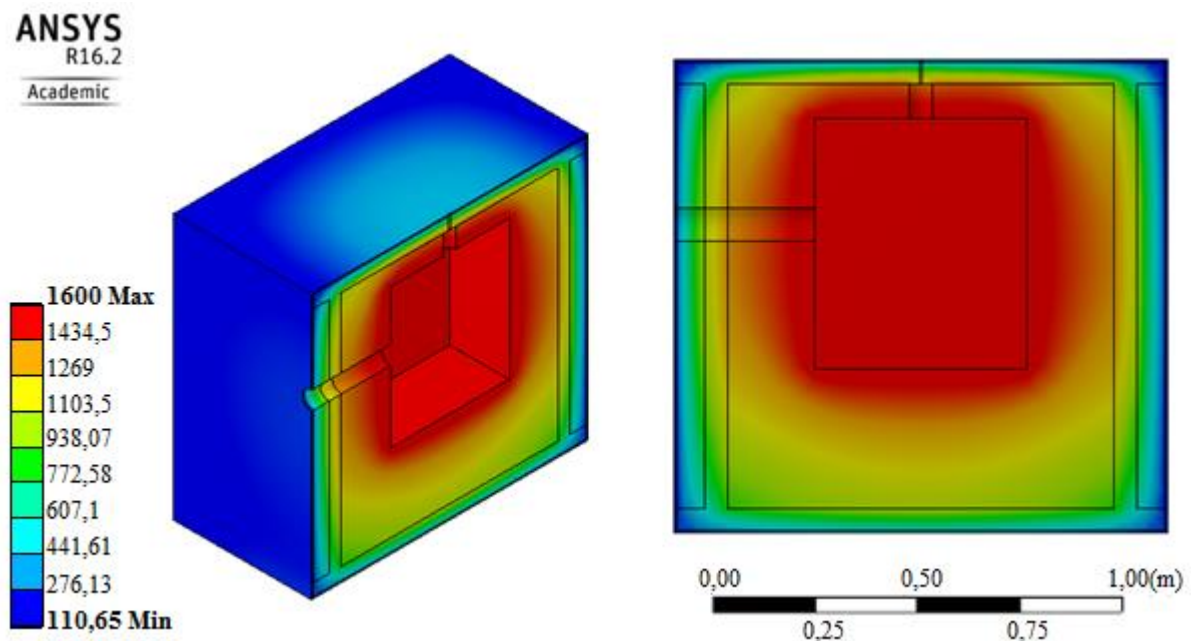
A Eq. 23 permite calcular a capacidade de processamento do forno para cinza úmida e, conseqüentemente, para cinza seca. Por fim, pode-se prever a eficiência térmica global como sendo a razão entre a energia disponível para vitrificação (energia útil) e a energia fornecida para a tocha, conforme Eq. 24.

$$\eta = \frac{\dot{E}_{vt}}{P_{elet} + \dot{m}_{GN}PCI + \dot{m}_{ar}h_{ar}} \quad (24)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A energia requerida para a tocha gerar o plasma é 59,8 kW. A simulação realizada no software ANSYS® sugere que o forno perde 8,03 kW de energia térmica por condução através das paredes. Esta quantidade de energia totaliza 15% da energia disponibilizada para o forno ou 13% da energia empregada na tocha. A análise numérica também permitiu avaliar as temperaturas nas paredes do forno, conforme Figura 23. Como as temperaturas das superfícies internas foram impostas, apenas os valores tomados para as superfícies externas das paredes são declarados. Os valores máximo e mínimo de temperatura previstos nestas superfícies foram de 574 °C e 110 °C, respectivamente. As temperaturas médias computadas são de 260 °C na superfície superior; 170 °C nas verticais; e 340 °C na inferior.

Figura 23 – Distribuição de temperaturas obtida através do modelo numérico.



Fonte: produção do autor.

Como o forno opera a temperaturas elevadas (1600 °C), espera-se que as temperaturas externas também sejam altas. No entanto, para algumas aplicações com restrições espaciais e/ou de operação, isso pode ser um problema, pois requer um cuidado maior com a segurança. Assim, seria pertinente a utilização de um sistema de arrefecimento para as paredes do forno, que pode ser simples (ventiladores) até modelos mais sofisticados empregando água. Esta solução requer atenção especial em seu projeto, uma vez que tanto estabelece vantagens, como o aumento da produtividade, dos períodos de operação e diminuição da degradação

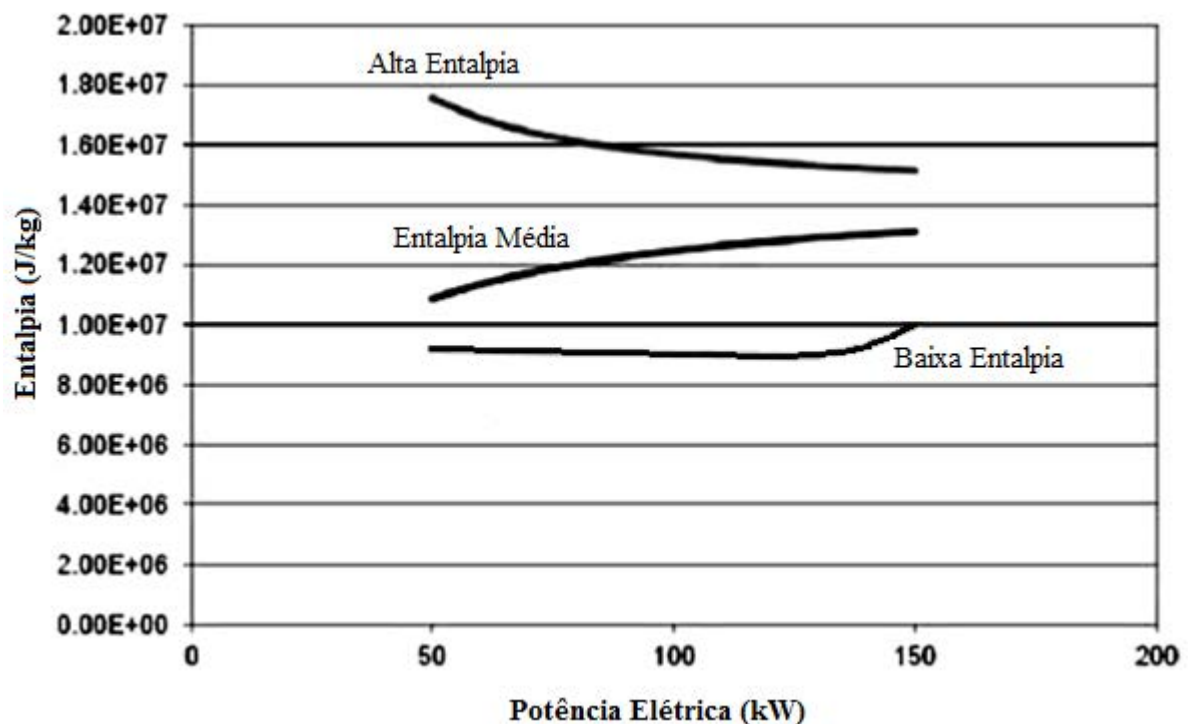
térmica, quanto pode intensificar as perdas de calor através das paredes do forno e, consequentemente, os custos de operação (TOULOUEVSKI; ZINUROV, 2013).

O balanço de energia na tocha forneceu uma entalpia de plasma de 8462 kJ/kg. Sendo assim, o jato de plasma entrega para o forno uma potência total de 53,1 kW. Após a determinação da entalpia, e obtendo a Eq. 25 a partir da integração da Eq. 19, foi calculada uma temperatura de 3782 °C para o plasma térmico.

$$h_{pl} - h_{ref} = 369T + \frac{2,9}{2}T^2 + \frac{3,6}{3}10^{-2}T^3 + \left. \frac{2,0}{4}10^{-5}T^4 + \frac{4,5}{5}10^{-10}T^5 + \frac{3,5}{6}10^{-14}T^6 \right]_{T_{ref}}^{T_{pl}} \quad (25)$$

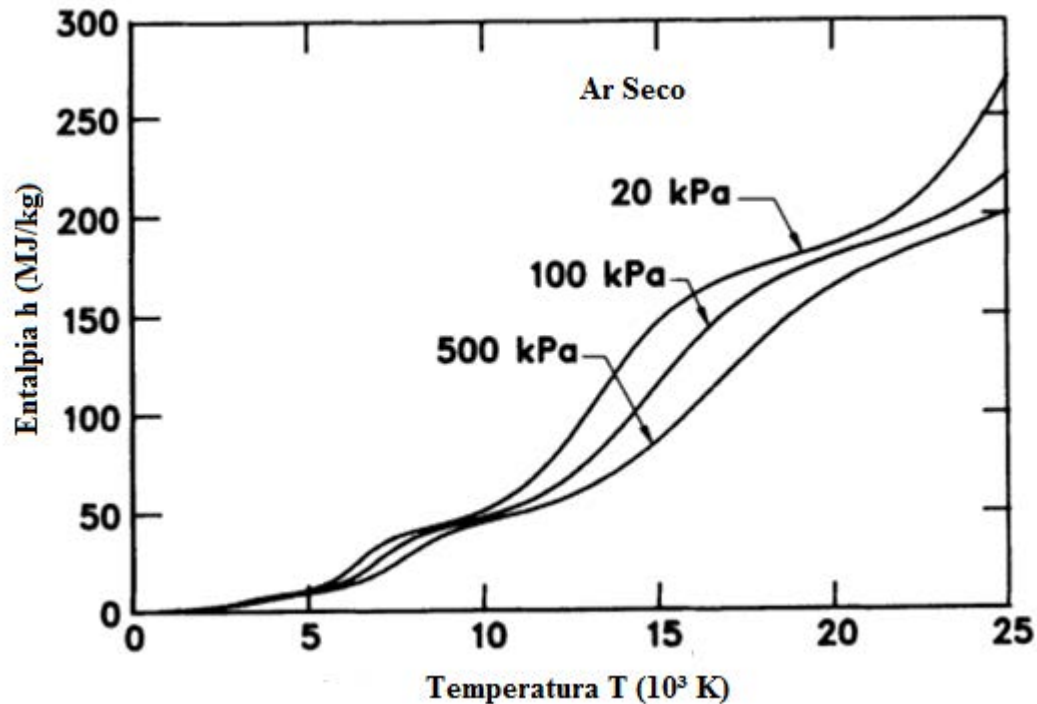
As Figuras 24 e 25 são exemplos de valores encontrados na literatura científica a respeito da entalpia e temperatura do plasma, que indicam a conformidade dos resultados. A primeira apresenta a variação da entalpia, para plasmas de baixa entalpia e características próximas às estudadas, de acordo com a potência consumida pela tocha. A segunda demonstra a relação entre entalpia e temperatura.

Figura 24 – Entalpia versus potência elétrica consumida pela tocha de plasma.



FONTE: Adaptado de (RAO; RIVARD; CARABIN, 2013).

Figura 25 – Entalpia do plasma a ar versus temperatura.



Fonte: Adaptado de (BOULOS; FAUCHAIS; PFENDER, 1994).

Finalmente, o balanço de energia indicou que, ao se desprezar as perdas de energia que ocorrem no forno, a energia disponível para o processo de vitrificação é igual a 33,6 kW. Sendo assim, a capacidade de processamento determinada é 62 kg/h, que está de acordo com o tencionado no início do projeto. Por último, calculou-se a eficiência térmica como sendo 56%. Para aplicações industriais esperam-se fornos com eficiência térmica de até 80%. Para aplicações que utilizam altas temperaturas, raramente a eficiência passa de 50% (MULLINGER; JENKINS, 2008). Sendo assim, o valor obtido parece coeso, levando em consideração as condições de operação do forno. Os resultados aludidos anteriormente estão resumidos na Tabela 5.

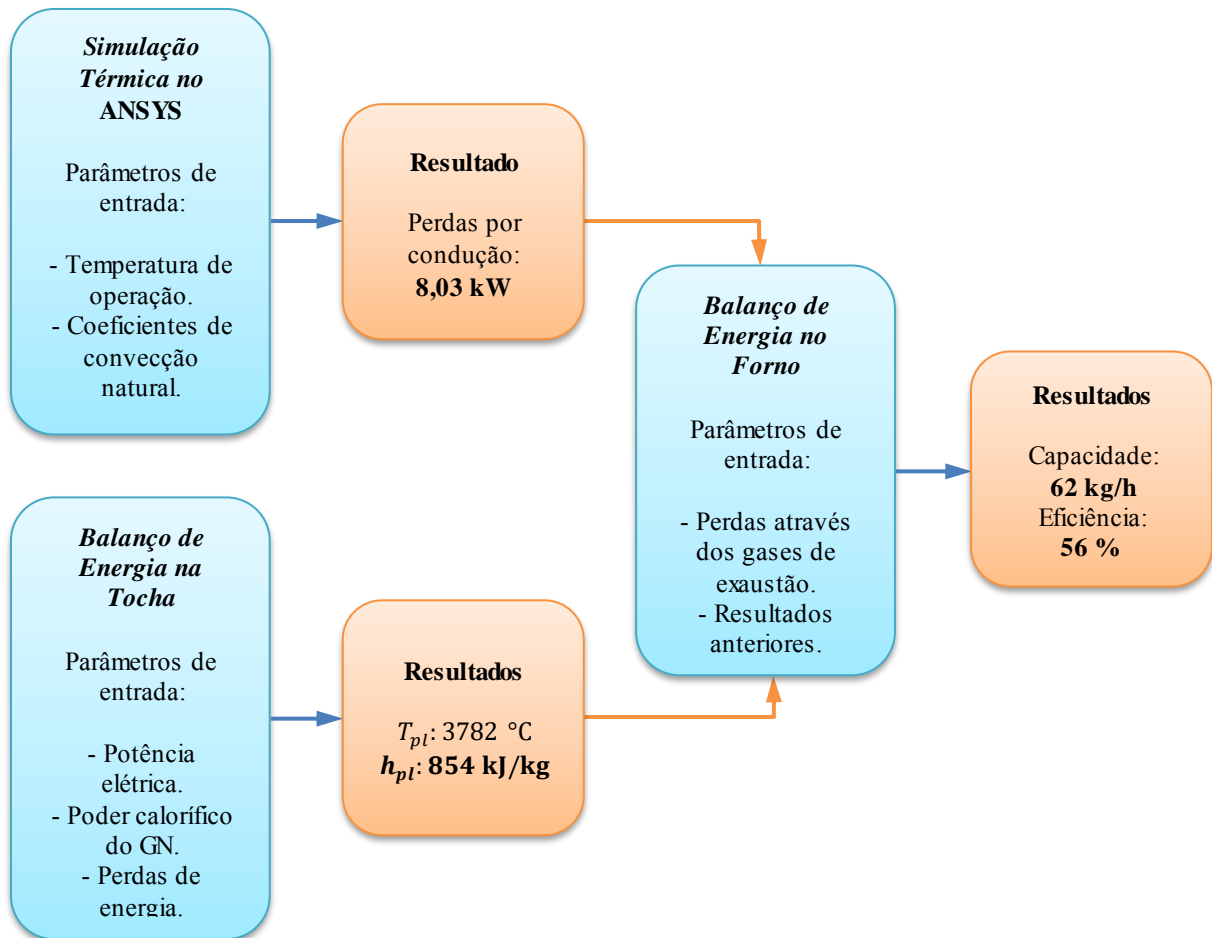
Tabela 5 – Resumo dos resultados obtidos, considerando cinza úmida.

Estudo	Resultado	
Simulação Térmica no ANSYS®	Temperatura Média das Superfícies Externas	260 °C (superior) 170 °C (verticais) 340 °C (inferior)
	Perdas de Energia Através das Paredes	8,03 kW
Balanço de Energia na Tocha	Potência Total Fornecida para a Tocha	59,8 kW
	Entalpia do Plasma	8542 kJ/kg
	Potência Fornecida pela Tocha para o Forno	53,1 kW
	Temperatura do Plasma	3808 °C
	Perdas Relativas à Água de Resfriamento.	6,69 kW
Balanço Global de Energia no Forno	Potência Disponível para Vitrificação	33,6 kW
	Perdas Relativas aos Gases de Exaustão	11,4 kW
	Perdas Totais de Energia	19,4 kW
	Capacidade	62 kg/h
	Eficiência	56 %

Fonte: produção do autor.

O resumo das etapas realizadas para obtenção dos resultados pode ser observado na Figura 26. A partir dos valores do coeficiente de convecção natural e conhecendo a temperatura de operação do forno, a simulação térmica no ANSYS® determinou as perdas de calor que ocorrem através das paredes do forno. A potência elétrica fornecida para a tocha de plasma, o poder calorífico inferior do gás natural e a variação de temperatura da água de resfriamento da tocha (perda de calor devido ao resfriamento), foram empregados no balanço de energia na tocha para obter a temperatura do jato de plasma e a quantidade de energia fornecida por este (entalpia). Por fim, com os valores de entalpia do plasma, da perda de calor através das paredes do forno e considerando a perda relacionada aos gases de exaustão (aferida durante o ensaio do forno), foi possível a realização do balanço de energia para determinação da capacidade de processamento de cinza úmida e a eficiência térmica.

Figura 26 - Etapas realizadas para obtenção dos resultados.



Fonte: produção do autor.

O balanço global de energia permitiu a obtenção de parâmetros que podem contribuir para etapas futuras do desenvolvimento. Embora seja uma tecnologia consolidada em muitos países, existem poucos estudos nacionais relacionados às características operacionais desse tipo de forno. Através do modelo numérico e das equações de conservação de energia, foi possível atestar a eficiência térmica do forno e sua capacidade de processamento. No entanto, o custo de processamento das cinzas reflete a necessidade de aprimoramento de alguns pontos. Levando em consideração o consumo de energia, sabendo que o forno possui capacidade de processamento de 62 kg/h, e aplicando as tarifas energéticas atuais (R\$ 0,55/kWh, conforme relatório da Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015), o custo de processamento de 1 kg de cinza é igual a R\$ 0,40, totalizando R\$ 24,75 no período de uma hora.

Algumas práticas podem ser adotadas com o intento de melhorar a capacidade de processamento das cinzas. A primeira é a utilização dos gases de exaustão para secagem prévia das cinzas, aumentando a capacidade de processamento do forno. A diminuição de

20% da umidade presente nas cinzas aumentaria a capacidade para 71 kg/h. Outra proposta é o aproveitamento do calor dissipado através das paredes, com a construção de uma estrutura composta por chapas ao redor do forno. O ar passaria pelo interior dessa estrutura antes de entrar na tocha, absorveria parte do calor proveniente das paredes, aumentando sua entalpia. O aumento da entalpia representa uma redução da energia elétrica consumida para elevá-la a valores condizentes com o estado de plasma. Como resultado, os gastos com a vitrificação são atenuados. O mesmo poderia ser feito com os gases de exaustão, empregando um trocador de calor.

Com a finalidade de diminuir as perdas de energia por condução através das paredes, foram feitas outras simulações com a adição de uma camada de tijolo isolante. O tijolo utilizado (*ISOREF C 40*) é produzido por eletrofusão, também suporta temperaturas elevadas e oferece uma condutividade térmica pequena, portanto favorável (GUERRA, 2014). A espessura da camada de tijolo escolhida é a máxima na qual a temperatura de operação do material foi respeitada. As principais propriedades do material utilizado são exibidas na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição e principais propriedades do tijolo isolante.

Características Físicas		
Composição	Alumina, Sílica e Soda	
Massa Específica	1230	kg/m ³
Condutividade Térmica		
500 °C	0,55	W/m K
800 °C	0,60	
1200 °C	28,0	

Fonte: Adaptado de (SAINT-GOBAIN, 2004).

A simulação seguiu os mesmos moldes da anterior, os novos resultados indicaram um acréscimo de 5 kg/h (67 kg/h) na capacidade de processamento, e uma dedução de 2,5 kW das perdas de energia através das paredes. A Tabela 7 mostra os resultados citados anteriormente.

Tabela 7 – Resultados obtidos com a adição do tijolo isolante.

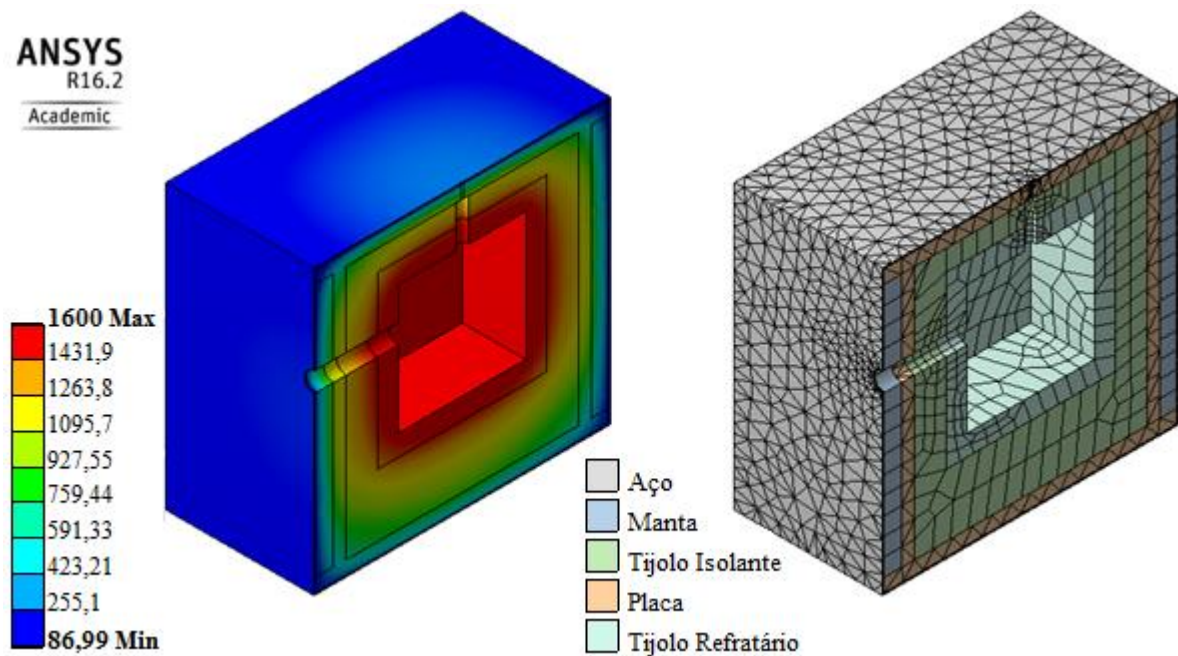
Resultados com Tijolo Isolante		
Perdas de energia através das paredes	5,55	kW
Capacidade	67	kg/h
Eficiência	60 %	

Fonte: produção do autor.

Portanto, ocorreu um aumento da eficiência térmica, uma vez que uma quantidade maior de energia será empregada na vitrificação das cinzas. A distribuição de temperaturas no forno pode ser observada na Figura 27. O valor máximo de temperatura encontrado nas superfícies externas das paredes foi de 420 °C e o mínimo de 87 °C, a temperatura média na superfície externa superior é de 205 °C, nas verticais de 153 °C e na inferior de 262 °C.

Os valores obtidos reforçam a importância da escolha dos materiais que compõem as paredes do forno, minimizando perdas de energia, aumentando a capacidade do processo e reduzindo custos relacionados à operação.

Figura 27 – Distribuição de temperatura obtida com adição do tijolo isolante.



Fonte: produção do autor.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Este trabalho apresentou o grande potencial da utilização de plasma térmico para tratamento de resíduos. Embora o objetivo inicial do forno estudado seja o processamento de cinzas provenientes de usinas de incineração, essa tecnologia pode ser aplicada a diversos tipos de resíduos, resolvendo o problema do descarte de lixos perigosos, como o industrial ou nuclear. Portanto, a vitrificação deve ser estudada e difundida para que nos próximos anos o desenvolvimento de fornos com esse princípio de funcionamento represente uma solução efetiva para o destino do lixo no país.

Os valores calculados para o custo de processamento indicam a necessidade de diminuir o consumo de energia elétrica, para viabilização desse tipo de forno. A redução do consumo elétrico está ligada com a melhoria do circuito elétrico e às iniciativas de aproveitamento do calor perdido, através das paredes e/ou pelo efluente gasoso. Nesse sentido, o cuidado na seleção e disposição dos materiais que compõem as paredes do forno constitui uma etapa de grande importância para o projeto.

Os valores obtidos para a entalpia e temperatura do plasma térmico mostraram-se muito coerentes com os valores encontrados na literatura. Vale lembrar que os cálculos adotados apropriaram-se de simplificações, e à medida que estas são abandonadas, valores mais próximos da realidade são alcançados. Uma análise numérica da tocha poderia melhorar os resultados.

Uma questão pertinente, recomendada para estudos futuros, é a realização de ensaios prolongados do forno, até que este atinja o estado de equilíbrio de suas temperaturas. Os ensaios realizados até o momento apresentaram um caráter demonstrativo, a fim de comprovar a capacidade de vitrificação de resíduos através do plasma. Como o período de tempo necessário para que o forno atingisse o regime permanente é grande, e devido à disponibilidade da equipe técnica, tal condição não foi alcançada. Portanto, não foi possível comparar os valores de temperatura determinados na análise de elementos finitos com dados experimentais.

Outro ponto a ser investigado é a natureza das transferências de calor no interior do forno. Uma indagação, que permeou a elaboração deste trabalho, foi a determinação dos mecanismos de transferência de calor entre o jato de plasma e as superfícies internas do forno, e suas respectivas contribuições. Inicialmente, admitiu-se que apenas as trocas radiativas eram notáveis, mas ao longo do desenvolvimento do projeto ficaram evidentes as significativas

contribuições da convecção para as trocas de calor. Uma vez que tal estudo foge dos objetivos propostos inicialmente, e devido à carência de informações a respeito do comportamento do jato de plasma, essa análise foi reservada para trabalhos pósteros. Na análise numérica apresentada, apenas considerou-se que as superfícies internas são mantidas uniformemente à temperatura de operação. Evidentemente, modelos mais refinados podem ser sugeridos à proporção que novas informações a respeito do forno e das tochas sejam providas através de ensaios.

Por fim, outra proposta a ser abordada oportunamente é o desenvolvimento dos sistemas de aperfeiçoamento do forno: de secagem das cinzas, de resfriamento das paredes, de aproveitamento do calor das paredes e do gás natural, estes para aquecimento do ar injetado. Tais sistemas precisam ser cuidadosamente projetados, pois como no caso do sistema de resfriamento, mesmo ocasionando vantagens para o processo, quando negligenciados podem intensificar as perdas energéticas.

À medida que o projeto do forno e seus periféricos forem consolidados, novos balanços globais de energia deverão ser realizados com melhor precisão. No entanto, para o estado atual do projeto, os resultados são satisfatórios e coerentes, assegurando o potencial da vitrificação no tratamento de resíduos. Espera-se que essa tecnologia, aliada a muitas outras, amenize os impactos ambientais causados pela geração desmedida de lixo, conseqüente do modelo de consumismo vivido pela sociedade atual.

REFERÊNCIAS

ANSYS. **Thermal analysis guide**: release 15. Canonsburg, 2013. 90 p. Disponível em: <<http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Mechanical%20APDL%20Thermal%20Analysis%20Guide.pdf>>. Acesso em: 6 maio 2015.

ASSET SERVICE COMMODITIES. **Agri-Waste Products**. 2015. Disponível em: <<http://www.assetsevicecommodities.com/agri-waste-products.php>>. Acesso em: 23 out. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 12 ed. São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2014. 118 p. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_edicoes.cfm>. Acesso em: 5 set. 2015.

BRASIL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatórios do Sistema de Apoio a Decisão**. Brasília, 2015. Tarifas médias por região, empresa e classe de consumo mensal e anual desde 2003. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=550>>. Acesso em: 26 nov. 2015.

BRASIL. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos industriais**. Brasília, 2012. 67 p. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120927_relatorio_residuos_solidos_industriais.pdf>. Acesso em: 5 set. 2015.

BOULOS, M. I.; FAUCHAIS, P.; PFENDER, E. **Thermal plasmas: fundamentals and applications**. 4th ed. New York: Plenum Press, 1994. p. 1-28.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 844 p.

ČARNOGURSKÁ, M. et al. Measurement and evaluation of properties of MSW fly ash treated by plasma. **Measurement**, v. 62, p. 155-161, fev. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224114005624>>. Acesso em: 20 dez. 2015.

CORTEZ, L. A. B.; GÓMEZ, E. O. A method for exergy analysis of sugarcane bagasse boilers. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 15, n. 1, São Paulo, mar. 1998. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S010466321998000100006>>. Acesso em: 23 out. 2015.

D' ANGOLA, A. et al. Thermodynamic and transport properties in equilibrium air plasmas in a wide pressure and temperature range. **The European Physical Journal D**, n. 46, p. 129-150, jan. 2008. Disponível em: <<http://www.researchgate.net/publication/200702842>>. Acesso em: 6 maio 2015.

ESSIPTCHOUK, A. M. et al. Thermal and power characteristics of plasma torch with reverse vortex. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 42, n. 17, São José dos Campos, aug. 2009. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/0022-3727/42/17/175205>>. Acesso em: 23 out. 2015.

FAVALLI, R. C.; SZENTE, R. N. Physical and mathematical modeling of non transferred plasma torches. **Brazilian Journal of Physics**, v. 28, n. 1, São Paulo, mar. 1998. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-97331998000100004>>. Acesso em: 23 out. 2015.

GANDHI, Heta. Plasma gasification: from a dirty city to a heavenly place and from waste solids to clean fuel. **International Journal for Innovative Research in Science & Technology**. v. 1, n. 11, Mumbai, abr. 2015. Disponível em: <<http://www.ijirst.org/articles/IJIRSTV1I11008.pdf>>. Acesso em: 8 nov. 2015.

GOMEZ, E. et al. Thermal plasma technology for the treatment of wastes: a critical review. **Journal of Hazardous Materials**, n. 161, p. 614-626, abr. 2008. Disponível em: <<http://www.researchgate.net/publication/5351510>>. Acesso em: 6 maio. 2015.

GUERRA, Marcelo. **Refratários eletrofundidos e refratários não conformados**. In: ESCOLA DE VIDRO – MÓDULO REFRAATÁRIO, 2014, São Paulo. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br/site/painel/arquivos/file/EDV-2014/5e6eletrofmoliticos-edv-refratario14.pdf>>. Acesso em: 8 nov. 2015.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 672 p.

JOHNSON, Marie C. **On vitrifying wastes using a plasma arc torch**. 2002. 78 f Report AEPI-IFP-0802E – Army Environmental Policy Institute, Atlanta, 2002. Disponível em: <<http://www.aepi.army.mil/publications/sustainability/docs/plasma-arc-oct28.pdf>>. Acesso em: 6 maio. 2015.

KIRAN, R. G.; KIRAN L. Analysis of strength characteristics of black cotton soil using bagasse ash and additives as stabilizer. **International Journal of Engineering Research & Technology**. v. 2, n. 7, jul. 2013. Disponível em: <<http://www.ijert.org/view-pdf/4549/analysis-of-strength-characteristics-of-black-cotton-soil-using-bagasse-ash-and-additives-as-stabilizer>>. Acesso em: 8 nov. 2015.

LENÇO, P. C. Revisão da literatura. In:___ **Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia**. 2010. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Térmicas e Fluidos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000779352>>. Acesso em: 8 nov. 2015.

MUCCIACITO, J. C. As boas práticas de incineração de resíduos. **Revista Meio Filtrante**, n. 71, nov. 2014. Disponível em: <http://www.meiofiltrante.com.br/materias_ver.asp?action=detalhe&id=968&revista=n71>. Acesso em: 8 nov. 2015.

MULLINGER, P.; JENKINS, B. **Industrial and process furnaces: principles, design and operation**. Burlington, MA: Elsevier Ltd., 2008. p. 3-29.

RAO L.; RIVARD F.; CARABIN P. **Thermal plasma torches for metallurgical applications**. In: 4th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing, The Minerals, Metals & Materials Society, 2013. Disponível em: <http://www.pyrogenesis.com/wp-content/uploads/2014/01/1.-TMS-2013-publications_Pyro-extract.pdf>. Acesso em: 23 set. 2015.

SAINT-GOBAIN. **Refractory Data Sheet: Supral S 60**. 2003, 1 p.

SAINT-GOBAIN. **Refractory Data Sheet: ISOREF C 140**. 2004, 1 p.

SONNTAG, R. E.; CLAUS, B.; VAN WYLEN, G. J. **Fundamentos da Termodinâmica**. 6 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003. p. 135-176.

SUNRISE REFRACTORY, **Features And Applications Of Silimanite Brick**. 2015. Artigo que descreve as propriedades da Sillimanite. Disponível em: <<http://www.fusedazs.com/news/88.html>>. Acesso em: 8 nov. 2015.

TOULOUEVSKI, Y. N.; ZINUROV, I Z. **Innovation in electric arc furnaces: scientific basis for selection**. 2nd ed. New York: Springer Heidelberg; London: Dordrecht, 2013. 282 p.

UNIFRAX. **Fibra moída fiberfrax: especificações do produto**. Vinhedo, 2000. 2 p. Disponível em: <<http://www.unifrax.com.br/pdf/Fibra%20Mo%C3%ADda%20Fiberfrax.pdf>>. Acesso em: 6 maio 2015.

UNIFRAX. **Placa duraboard RK**: especificações do produto. Vinhedo, 2001. 2 p. Disponível em: <<http://www.unifrax.com.br/pdf/Placa%20Duraboard%20RK.pdf>>. Acesso em: 6 maio 2015.

UNITED STATES OF AMERICA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Vitrification technologies for treatment of hazardous and radioactive waste**. EPA/625/R-92/002. Washington, D.C.: Office of Research and Development, 1992. 98 p. Disponível em: <<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=30004JDS.PDF>>. Acesso em: 6 maio 2015.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE BRASÍLIA. **Exemplos de plasma**. Brasília, 2004. Galeria de figuras que exemplificam as manifestações do plasma. Disponível em: <<http://trad.fis.unb.br/plasmas/exemplos.htm>>. Acesso em: 5 nov. 2015.

UNIVERSITY OF VIRGINIA. **Thermal Spray Laboratory**. Charlottesville, 2014. Department of material science and engineering. Disponível em: <<http://www.virginia.edu/ms/research/wadley/lab-ts.html>>. Acesso em: 5 nov. 2015.