

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS  
GERAIS  
ENGENHARIA MECÂNICA

WELLINGTON FLAVIO DA SILVA COTTA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM FORNO FUSOR DE  
INDUÇÃO TIPO CADINHO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

BETIM

2022

WELLINGTON FLAVIO DA SILVA COTTA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM FORNO FUSOR DE  
INDUÇÃO TIPO CADINHO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Betim como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Bruno de Souza Baptista

BETIM

2022

## FICHA CATALOGRÁFICA

C846a Cotta, Wellington Flávio da Silva  
Análise da eficiência energética de um forno fusor de indução tipo cadinho / Wellington Flávio da Silva Cotta. – 2022. 35 f.: il.  
Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2022.

Orientação: prof. Bruno de Souza Baptista.

1. Eficiência energética. 2. Fornos de indução. 3. Fundição. 4. Contribuição de melhoria. I. Wellington Flávio da Silva Cotta. II. Título.

CDU: 621.7



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS  
Campus Betim  
Diretoria de Ensino  
Docentes Mecânica  
Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG  
3135976360 - www.ifmg.edu.br

**ATA DA REUNIÃO DE APRESENTAÇÃO DE TCC DO  
ALUNO WELLINGTON FLÁVIO DA SILVA COTTA  
REALIZADA EM 12 DE JULHO DE 2022**

No dia 12 de Julho de 2022, às 18:30 horas, o aluno WELLINGTON FLÁVIO DA SILVA COTTA, do curso de Engenharia Mecânica do IFMG - *Campus* Betim, apresentou o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado **ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM FORNO FUSOR TIPO CADINHO** e foi **APROVADO** com a **nota 95,0**. O registro da nota no sistema está condicionada ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa do TCC, devendo apresentar o trabalho com as devidas modificações até a primeira semana do mês de agosto de 2022 em meio eletrônico.

O aluno está ciente de que, caso não cumpra os procedimentos pós apresentação de TCC até a data estipulada, poderá ter a nota considerada zero e neste caso sua defesa de TCC será considerada nula. Também está ciente de que seu TCC poderá ser divulgado pela Instituição através dos seus meios de comunicação.

Assinam esta ata o presidente da banca professor Bruno de Souza Baptista e os membros da banca, professora Nayara Aparecida Neres da Silva e o professor Gabriel Mendes de Almeida Carvalho.

O encerramento da banca ocorreu às 19:45

Betim, 14 de julho de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Bruno de Souza Baptista, Professor**, em 16/08/2022, às 15:00, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Gabriel Mendes de Almeida Carvalho, Professor**, em 16/08/2022, às 16:09, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **1288943** e o código CRC **BFA15F81**.

## RESUMO

Com a crescente da demanda de energia no mundo para atender as necessidades da sociedade, surge a necessidade de desenvolvimento de estudos e pesquisas para o aumento da eficiência energética em processos industriais, visando a sustentabilidade e a redução dos custos de operação. O balanço energético nacional de 2022 divulgado pela EPE demonstra que em 2021 o setor Metalúrgico foi responsável por 27,8% do consumo energético industrial e por 9% do consumo total de energia no Brasil. O presente trabalho se trata de um estudo de caso sobre a eficiência energética de um forno de indução tipo cadinho que opera no processo de fusão de ligas de ferro fundido e que está instalado em uma fundição situada no estado de Minas Gerais. Foi adotado um modelo para o cálculo do consumo ideal (mínimo termodinâmico) através dos balanços de entalpia das matérias primas. A eficiência energética encontrada de 73% (em média), demonstra que existem oportunidades de melhorias. As melhorias propostas com base nas melhores práticas apresentam um potencial de redução do consumo específico (kWh/t) e, conseqüentemente, do aumento da eficiência energética.

**Palavras-chave:** Eficiência Energética. Forno de indução. Fundição. Melhoria Contínua.

## ABSTRACT

With the growing demand for energy in the world to meet the needs of society, there is a need to develop studies and research to increase the energy efficiency in industrial processes, aiming at sustainability and reducing operation costs. The 2022 national energy balance released by EPE shows that in 2021 the Metallurgical sector was responsible for 27.8% of industrial energy consumption and for 9% of total energy consumption in Brazil. The present work is a case study on the energy efficiency of a crucible-type induction furnace that operates in the melting process of cast iron alloys and which is installed in a foundry located in the state of Minas Gerais. A model was adopted to calculate the ideal consumption (thermodynamic minimum) through the enthalpy balances of the raw materials. The energy efficiency found of 73% (on average), demonstrates that there are opportunities for improvement. The improvements proposed based on best practices have the potential to reduce specific consumption (kWh/t) and, consequently, increase energy efficiency.

**Keywords:** Energy Efficiency. Induction Furnace. Foundry. Continuous Improvement.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados técnicos do forno.....	21
Tabela 2 - Entalpia específica à 1500°C .....	24
Tabela 3 - Composição química do Gusa Líquido.....	26
Tabela 4 - Dados de amostras das corridas do forno de indução tipo cadinho .....	27
Tabela 5 - Estimativas de localização e variabilidade da Eficiência Energética .....	28
Tabela 6 - Ganhos estimados de eficiência energética.....	30

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista em corte de um molde de areia com adição de macho.....	13
Figura 2 – Visão geral de uma instalação de um forno de indução tipo cadinho.....	14
Figura 3 - Forno de Indução a cadinho .....	15
Figura 4 - Vista em corte de um forno de indução tipo cadinho .....	16
Figura 5 - Balanço de energia para um sistema de fusão por indução .....	20
Figura 6 - Visão geral da instalação .....	22
Figura 7 - Etapas do ciclo de uma corrida.....	23

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição do consumo energético numa fundição .....	10
Gráfico 2 – Relação entre o Calor Especifico x Entalpia x Temperatura da areia .....	19
Gráfico 3 - Distribuição dos dados calculados de Eficiência Energética .....	28

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1 Formulação do Problema .....</b>	<b>9</b>
<b>1.2 Justificativa .....</b>	<b>9</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Geral.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2 Específico .....</b>	<b>11</b>
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
<b>3.1 Indústria de Fundição.....</b>	<b>12</b>
<b>3.2 Processo de Fusão por Indução.....</b>	<b>14</b>
<b>3.3 Eficiência Energética em Fornos a Indução .....</b>	<b>16</b>
3.3.1 Mínimo Termodinâmico .....	17
3.3.2 Perdas de Energia em Fornos de Indução .....	19
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>21</b>
<b>4.1 Tipo de Pesquisa.....</b>	<b>21</b>
<b>4.2 Objeto de Estudo .....</b>	<b>21</b>
<b>4.3 Materiais e Métodos.....</b>	<b>24</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>31</b>
<b>6.1 Conclusão.....</b>	<b>31</b>
<b>6.2 Recomendações .....</b>	<b>31</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>32</b>
<b>ANEXO A – TABELA DE ENTALPIA DOS ELEMENTOS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....</b>	<b>34</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 Formulação do Problema**

Cada vez mais, cresce a demanda de energia para satisfazer as necessidades da humanidade, assim como seu desenvolvimento econômico. Segundo Owusu (2016), nos últimos anos foram realizadas diversas pesquisas e desenvolvimentos com a finalidade de apresentar práticas sustentáveis, visando o atendimento das demandas energéticas e a redução do impacto ambiental.

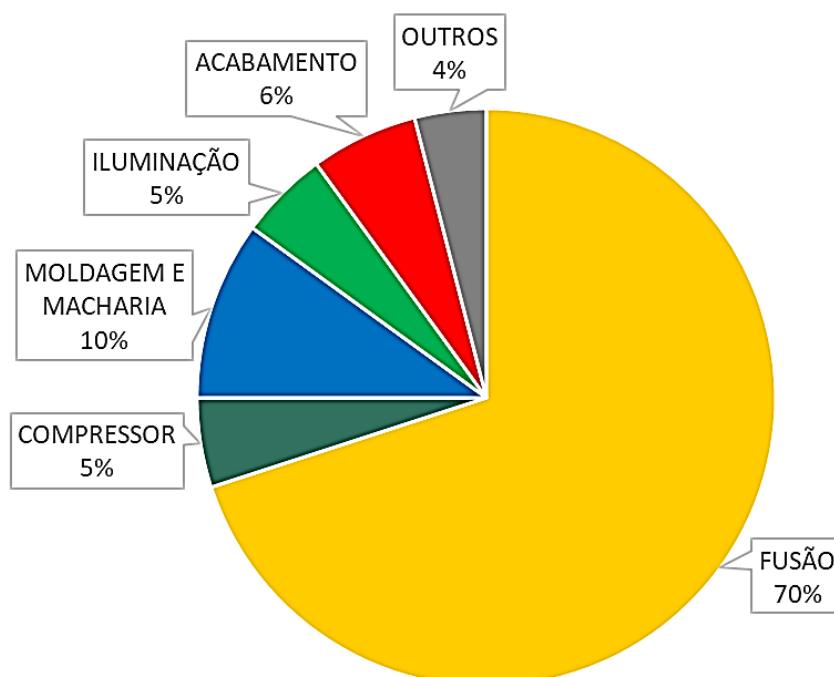
O objeto estudado neste trabalho é um forno fusor tipo cadinho de média frequência, que opera na produção de ligas de ferro fundido. Por ser um equipamento instalado a poucos anos na empresa analisada, não haviam sido realizados estudos específicos com foco na análise de sua eficiência energética. Dessa forma, o presente estudo procurou responder as seguintes perguntas: Qual a eficiência energética atual do equipamento? Existe um campo de oportunidades de melhoria? Quais as boas práticas existentes e quais os possíveis ganhos ao implementá-las?

### **1.2 Justificativa**

Ao longo do período de 1970 até 2021, a participação do setor metalúrgico no consumo energético nacional teve um crescimento acentuado, alcançando no final deste período 27,8% do consumo do setor industrial e 9,0% do consumo total de energia do país (EPE, 2022).

Segundo Arasu e Jeffrey (2009), em processos industriais de fundição, o principal responsável pelo consumo de energia é a área da fusão (Gráfico 1). Fornos fusores são os equipamentos que consomem a maior parte da energia demandada em processos de fundição. O aumento da eficiência energética destes equipamentos gera impactos significantes nos custos de operação, o que possibilita o aumento da lucratividade, o aumento da sustentabilidade do processo, além da possibilidade de fornecer ao mercado produtos com valores mais competitivos.

Gráfico 1 - Distribuição do consumo energético numa fundição



Fonte: Arasu e Jeffrey (2009).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Analisar a eficiência energética de um forno de indução fusor tipo cadinho.

### **2.2 Específico**

- Realizar um estudo bibliográfico sobre métodos de análise de eficiência energética em fornos fusores;
- Analisar a eficiência energética de um forno estudado em diferentes cenários de operação;
- Identificar o campo de oportunidades para realizar melhorias no processo.
- Propor soluções para o aumento da eficiência energética e para a redução dos custos de operação.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Indústria de Fundição

A indústria de fundição é um segmento da economia que se caracteriza pela produção de bens intermediários, fornecendo em sua maioria, peças fundidas a diversas outras indústrias. O processo de fundição consiste na fusão de um metal que, em estado líquido, é vazado em um molde e ao solidificar-se gera uma peça com o formato desejado (BIOLO, 2005).

Segundo Chiaverini (1986), os principais processos de fundição existentes são: moldagem em areia (fundição por gravidade), fundição sob pressão, fundição por centrifugação e fundição de alta precisão. O tipo de liga a ser fundida, o tamanho e a geometria da peça, o número de peças e a qualidade superficial desejada, são os principais parâmetros considerados na escolha do processo mais adequado.

Segundo Castro et. al, (2010), o processo de fundição por gravidade possui as seguintes etapas:

**Confecção do molde:** esta etapa se inicia com a preparação da mistura de areia e aditivos (carvão, resinas, bentonita, etc.). O molde é produzido através da compactação da mistura de areia sobre um modelo, formando a(s) cavidade(s) com o formato similar ao da peça final. Durante a compactação também são formados os canais de alimentação, que são os caminhos por onde o metal líquido percorre até chegar à cavidade do produto e o(s) massalote(s), que são reservatórios preenchidos com metal líquido e são necessários para compensar a contração do ferro fundido durante a solidificação (CASTRO *et al.* 2010).

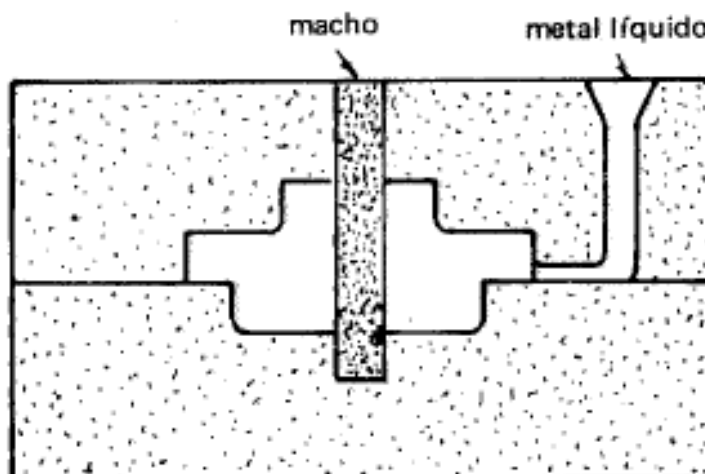
**Confecção do macho:** misturas de areia e resina(s) são injetadas no interior de ferramentais através de máquinas sopradoras (uso de ar comprimido). A areia preenche os vazios no interior do ferramental, obtendo a geometria da cavidade. Após o sopro, ocorre o endurecimento da resina que fornece a resistência mecânica ao macho. Após confeccionados, os machos são colocados nos moldes antes que estes sejam fechados para receber o metal líquido. Diferente do molde, que delimita as partes externas da peça fundida, o macho é uma peça que delimita as partes internas do produto (cavidades, canais, vazios). Durante o vazamento, o macho fica

completamente envolto em metal líquido, ocupando o volume que ficará vazio posteriormente (CASTRO *et al.* 2010).

Confecção dos respiros (ou saída de gás): a medida que o metal líquido é vazado no interior do molde, é preciso expulsar o ar e os gases que estavam no interior do molde. Assim, é necessária a confecção dos respiros, que são os canais para a saída do ar presente nas cavidades e dos gases gerados durante o vazamento (CASTRO *et al.* 2010).

Fechamento do molde: O molde é composto de duas metades (Figura 1), sendo o(s) macho(s) colocado(s) na metade inferior (quando necessário) e fechado pela metade superior (CASTRO *et al.* 2010).

Figura 1 - Vista em corte de um molde de areia com adição de macho



Fonte: Chiaverini, 1986.

Fusão: Nessa etapa ocorre a transformação da matéria prima em metal líquido. A fusão ocorre em fornos fusores, que são equipamentos que empregam grandes quantidades de energia para gerar calor e fundir a matéria prima. Após fundido, o metal líquido é adequado ao parâmetro técnico do produto a ser fabricado (temperatura, composição química, nucleação, etc.) (CASTRO *et al.* 2010).

Vazamento: O metal líquido é transferido do forno para panelas de vazamento que vertem o metal no interior dos moldes (CASTRO *et al.* 2010).

Desmoldagem: Operação de retirada da peça sólida de dentro do molde.

Quebra de canais e massalotes: Etapa onde é realizada a remoção do sistema de alimentação (canais e massalotes) do(s) produto(s) fundido(s). Essa remoção é feita através de dispositivos hidráulicos ou pneumáticos (CASTRO *et al.* 2010).

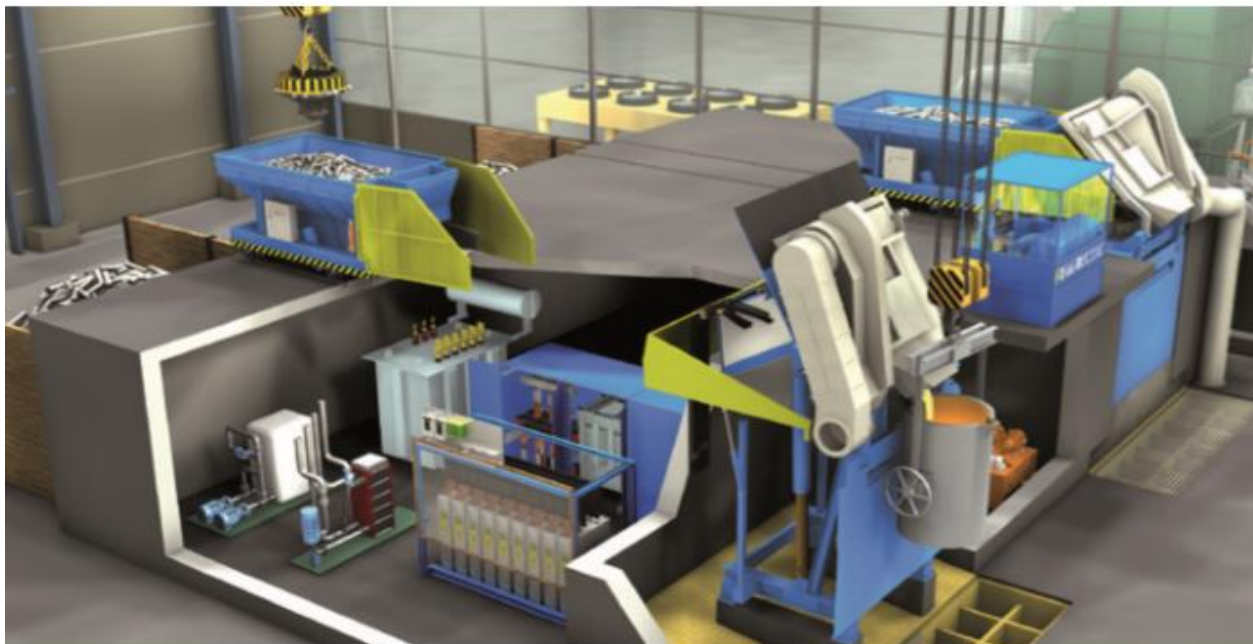
Rebarbação e limpeza: Após a quebra dos canais e massalotes, é necessária a retirada de incrustações de areia do molde presentes na peça fundida; a limpeza é feita, em geral, com jatos abrasivos. Finalizada a limpeza, algumas regiões da peça são usinadas para a remoção das rebarbas existentes (CASTRO *et al.* 2010).

### 3.2 Processo de Fusão por Indução

Fornos de indução são equipamentos supridos com corrente elétrica, utilizados no processo de fusão de materiais ferrosos e não ferrosos, assim como nos processos de manutenção de temperatura e superaquecimento do metal líquido (KLEIN NETO *et al.* 1989).

O forno de indução a cadinho (Figura 2) é constituído por uma bobina indutora que possui em seu interior um cadinho de material refratário, onde é colocada a carga metálica a ser fundida.

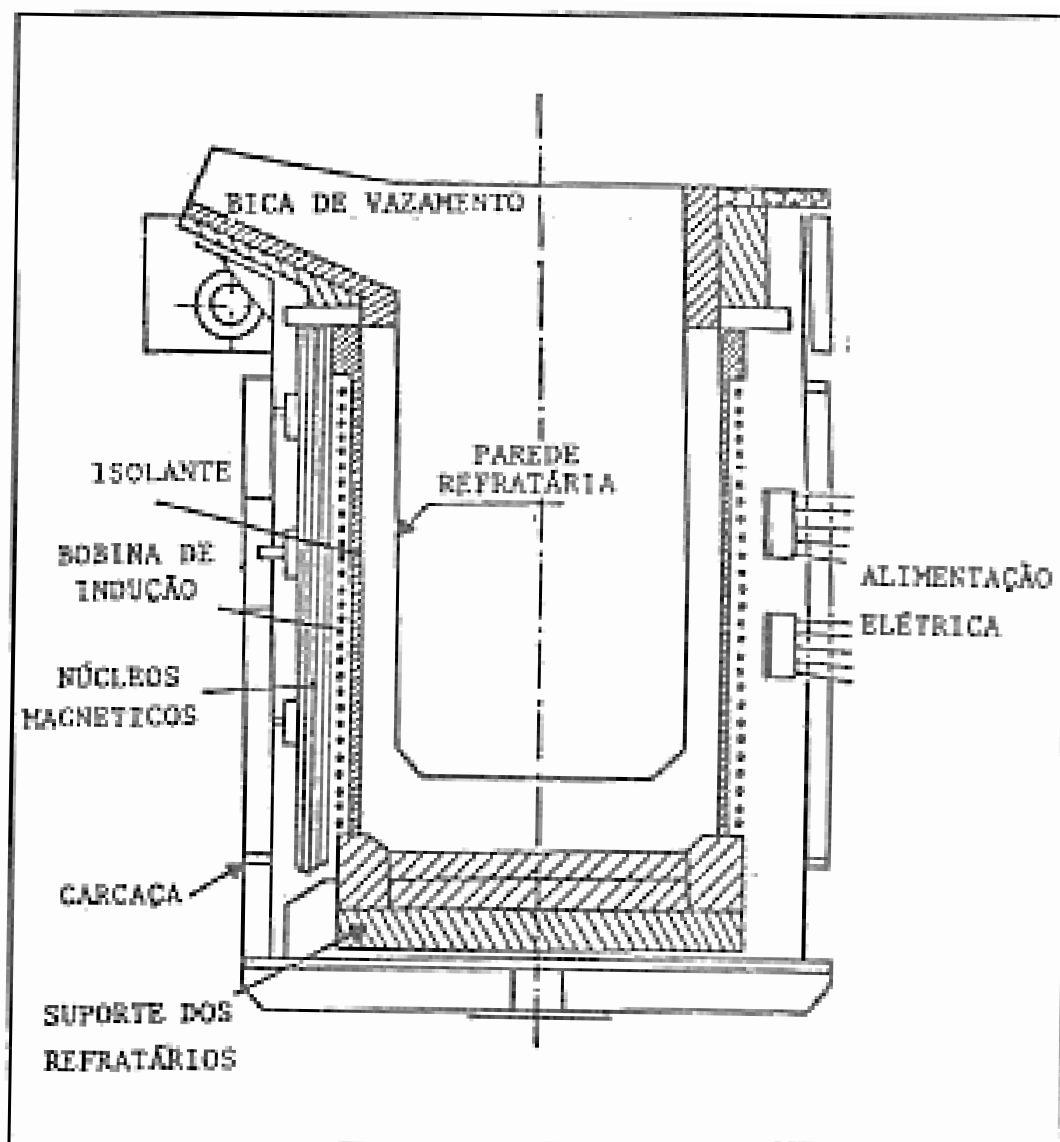
Figura 2 – Visão geral de uma instalação de um forno de indução tipo cadinho



Fonte: Otto Junker (2022).

A Figura 3 representa esquematicamente os principais componentes que constituem o cadinho do forno de indução.

Figura 3 - Forno de Indução a cadinho

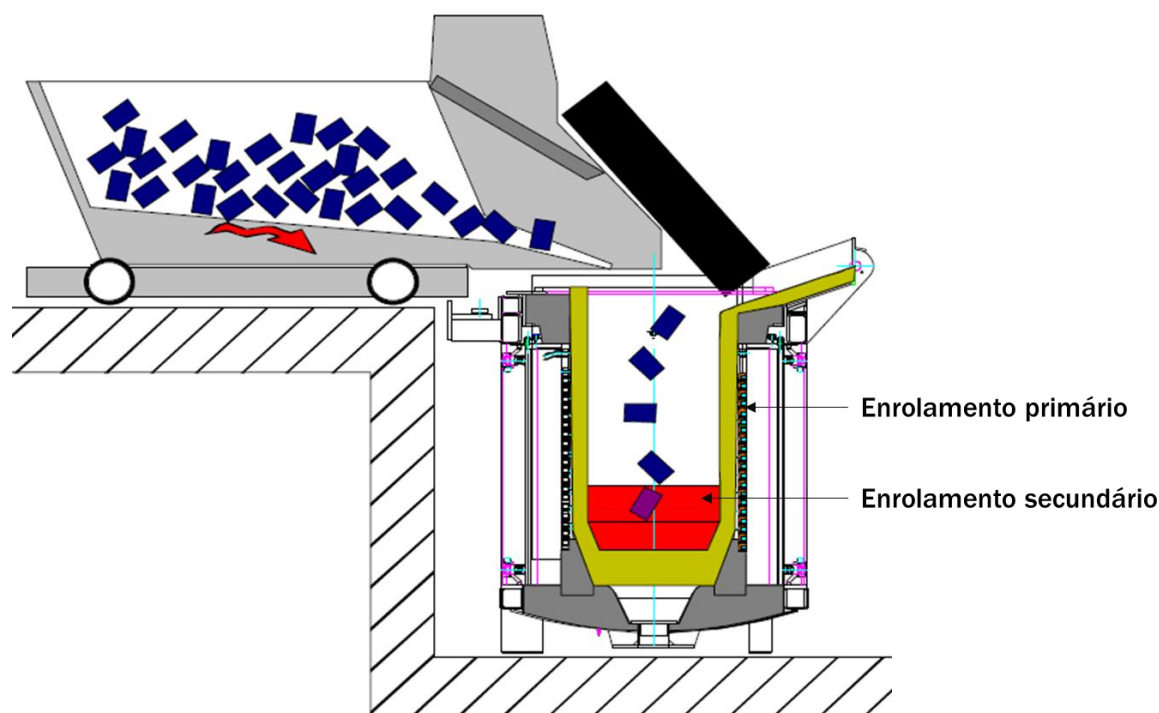


Fonte: Klein Neto *et al* (1989).

O revestimento refratário do cadinho é dimensionado para proteger a bobina da condução térmica e não interferir no acoplamento magnético entre o indutor e a carga. Este revestimento possui vida útil e, sendo assim, é substituído de tempos em tempos (KLEIN NETO *et al*. 1989).

Segundo Chiaverini (1986), no princípio da indução, a carga metálica constitui o enrolamento secundário do circuito. O enrolamento primário é constituído pela bobina de cobre refrigerada a água, presente entre a carcaça e o revestimento refratário do forno (Figura 4).

Figura 4 - Vista em corte de um forno de indução tipo cadinho



Fonte: Hermann & Kroes (2010).

O processo de fusão se inicia com o carregamento da matéria prima no cadinho, que varia de acordo com a liga desejada, custo e disponibilidade. Após o carregamento inicial, se inicia o processo de fusão através da alimentação da bobina primária, que induz uma corrente de elevada intensidade na carga metálica (secundário), aquecendo-a rapidamente através do efeito Joule. Quando uma determinada quantidade do material se funde e vira metal líquido no interior do forno, inicia-se uma forte agitação interna pela influência do campo magnético, que acelera o processo de fusão. Após ser fundida completamente toda carga metálica, o metal é superaquecido até a temperatura desejada e vazado em painéis de transferência (CHIAVERINI, 1986).

### 3.3 Eficiência Energética em Fornos a Indução

Segundo Van Wylen (2018), a eficiência de uma máquina onde ocorre um processo térmico, envolve uma comparação entre o desempenho real da máquina, sobre dadas condições, e o desempenho que ela teria num processo ideal.

### 3.3.1 Mínimo Termodinâmico

“A termodinâmica é a ciência que trata do calor e do trabalho, e daquelas propriedades das substâncias relacionadas ao calor e ao trabalho” (VAN WYLEN, 2018, p. 11).

Um estado termodinâmico é definido por três propriedades: temperatura, pressão e volume do sistema. Um processo termodinâmico envolve a alteração destas propriedades, através da adição ou remoção de energia, na forma de calor e/ou trabalho (VAN WYLEN, 2018).

Segundo Van Wylen (2018), a primeira lei da termodinâmica apresenta a Conservação de Energia, a relação entre energia (total) do sistema, trabalho e calor de um processo termodinâmico:

$$E_2 - E_1 = Q - W$$

Sendo:

E = Energia do sistema [kJ]

Q = Calor [kJ]

W = Trabalho [kJ]

O trabalho, segundo Van Wylen (2018), pode ser calculado a partir da variação da pressão em função do volume do sistema:

$$W = \int_1^2 p \, dV$$

Para o caso especial de um processo a pressão constante (processo isobárico), Van Wylen (2018) afirma que o trabalho realizado pelo sistema é dado como o produto da pressão constante (p) vezes a variação do volume (V):

$$W = p * (V_2 - V_1)$$

Substituindo na equação da primeira lei, tem-se:

$$E_2 - E_1 = Q - p * (V_2 - V_1)$$

Considerando as energias cinética e potencial gravitacional constantes ou sua variação igual a zero (desprezíveis em relação às outras variações de energia), Van Wylen (2018) afirma que a variação da energia do sistema  $E$  é igual a variação da energia interna  $U$ .

$$U_2 - U_1 = Q - p * (V_2 - V_1)$$

$$(U_2 + p*V_2) - (U_1 + p*V_1) = Q$$

A expressão  $(U + p*V)$  pode ser substituída pela propriedade extensiva chamada entalpia ( $H$ ), uma vez que todos os seus elementos são propriedades termodinâmicas que representam um estado do sistema (VAN WYLEN, 2018).

$$H_2 - H_1 = Q$$

Segundo Van Wylen (2018), através das definições da termodinâmica, tem-se que a quantidade de calor é função da massa do sistema e de seu calor específico, associadas à variação da temperatura:

$$Q = m * c_p * (T_2 - T_1)$$

$$(H_2 - H_1) = m * c_p * (T_2 - T_1)$$

Dividindo ambos os lados da equação pela massa, obtém-se a equação da entalpia específica,  $h$ .

$$(h_2 - h_1) = c_p * (T_2 - T_1)$$

Sendo:

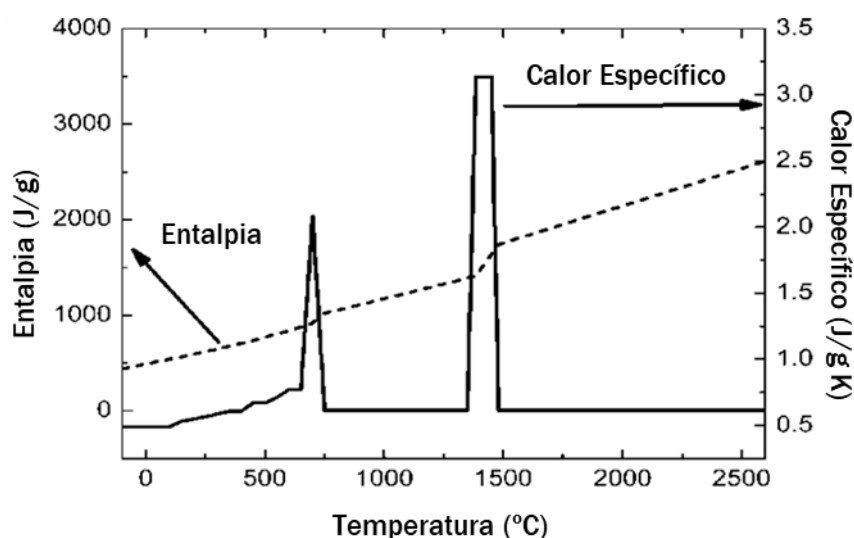
$h$  = entalpia específica [kJ/kg]

$c_p$  = calor específico (à pressão constante), definido como a quantidade de calor necessário para elevar a temperatura de um grau Celsius por unidade de massa. [kJ/kg°C ou kJ/kgK]

$T$  = temperatura. [ $^{\circ}\text{C}$  ou  $\text{K}$ ] (considerando variação de temperatura, pode-se usar as duas unidades).

O Gráfico 2 demonstra a relação entre a entalpia específica  $h$  e o calor específico  $c_p$  em função da temperatura, em um processo de aquecimento de areia.

Gráfico 2 – Relação entre o Calor Específico x Entalpia x Temperatura da areia



Fonte: CHEN, Y, *et al.* (2006), traduzido pelo autor.

Através da variação da entalpia no processo de fusão de ligas metálicas, pode-se determinar o mínimo termodinâmico, que é a menor quantidade de energia possível a ser utilizada em um processo de fundição. A variação da entalpia depende da variação de temperatura necessária ( $\Delta T$ ) e da relação de materiais usados como matéria prima, visto que o calor específico varia de acordo com o material utilizado (DÖTSCH, 2017).

### 3.3.2 Perdas de Energia em Fornos de Indução

Apesar do forno de indução a cadinho ser um equipamento de elevada eficiência energética, suas perdas são consideráveis (KLEIN NETO, 1989). As perdas de energia nestes equipamentos podem ser classificadas em três grupos:

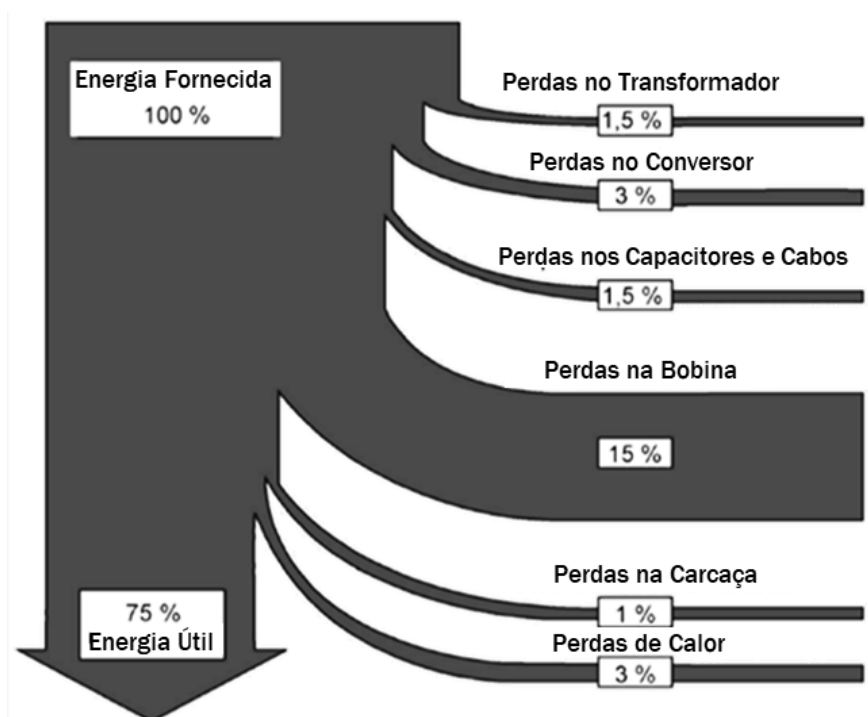
- Perdas inerentes ao processo: Caracterizadas por serem próprias do equipamento, como por exemplo, perdas de transformação na bobina indutora;

- Perdas devido às características do equipamento: São aquelas geradas pelo tipo de forno e suas características de projeto;
- Perdas na operação: Perdas que são dependentes da eficiência operacional (disponibilidade, performance e qualidade), das atividades que ocorrem antes, durante e depois da fusão (densidade da carga, limpeza e umidade da matéria prima, tempo de abertura da tampa, método de escorificação, etc.) e dos eventos que podem ocorrer ao longo do processo (incrustações de escória no cadinho, desgaste do revestimento refratário, entre outros).

Segundo Dötsch (2017), o rendimento máximo de fornos de indução a cadinho operando a média frequência variam entre 75 - 80%. A Figura 5 apresenta um balanço térmico simplificado para estes equipamentos.

Para alcançar uma eficiência ainda maior, pesquisas estão sendo realizadas com foco na melhoria dos materiais que constituem o sistema elétrico e o isolamento térmico dos fornos de indução (HERMANN & KROES, 2010). As perdas na operação, por sua vez, dependem das práticas empregadas nas operações que antecedem e ocorrem durante a fusão (KLEIN NETO 1989).

Figura 5 - Balanço de energia para um sistema de fusão por indução



Fonte: Dötsch (2017), traduzido pelo autor.

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo é definido o tipo de pesquisa, o objeto de estudo, os materiais e métodos utilizados no trabalho, a metodologia de coleta de dados e a forma de interpretação das informações adquiridas.

### 4.1 TIPO DE PESQUISA

Segundo Gil (2002), o principal objetivo da pesquisa descritiva é descrever as características de um determinado fenômeno ocorrido em uma amostra ou população. A pesquisa pode ser realizada através de um estudo de caso que, segundo Yin (2005) caracteriza-se por um estudo aprofundado e detalhado do objeto de investigação, resultando em uma compreensão ampla e detalhada de suas características.

Segundo Richardson (1999), a pesquisa quantitativa caracteriza-se pelo uso da quantificação na forma como a informação é coletada e na forma como ela é processada por meio de técnicas estatísticas.

Como definição, esse trabalho se enquadra como sendo um estudo de caso de caráter descritivo e quantitativo, uma vez que os dados serão coletados e processados por meio de técnicas estatísticas.

### 4.2 Objeto de Estudo

Este trabalho se propôs a analisar a eficiência energética de um forno fusor tipo cadinho. A Tabela 1 contém as informações técnicas do equipamento estudado:

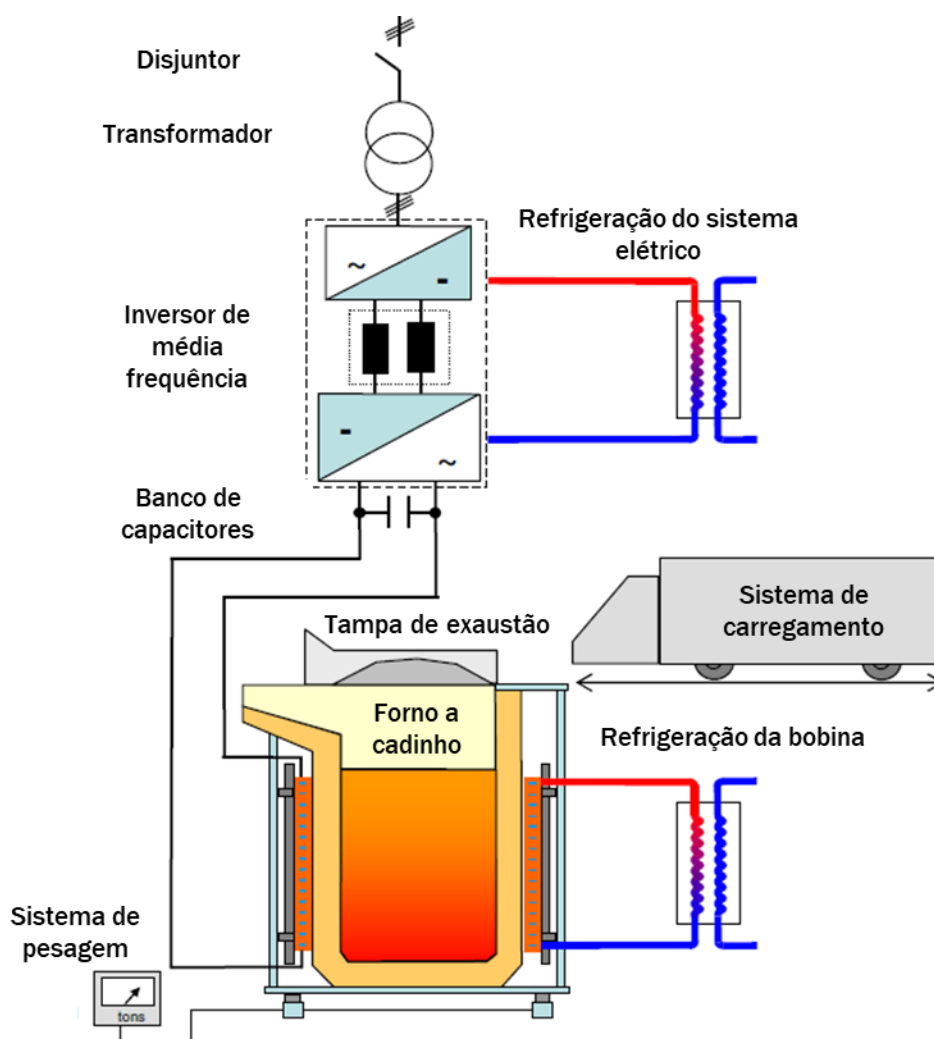
Tabela 1 - Dados técnicos do forno.

Fabricante	ABP
Ano de instalação	2014
Potência Máxima	16MW
Capacidade Nominal	27 toneladas
Volume do Cadinho	3,65 m <sup>3</sup>

Fonte: Dados fornecidos pela empresa.

A Figura 6 demonstra esquematicamente os sistemas de alimentação, carregamento, pesagem, exaustão e refrigeração do forno. Para controles das corridas, o equipamento possui medidores de consumo de energia e células de carga para controle do peso; os valores medidos são exibidos diretamente no painel de operação.

Figura 6 - Visão geral da instalação



Fonte: Chaabet & Dötsch (2015), traduzido pelo autor.

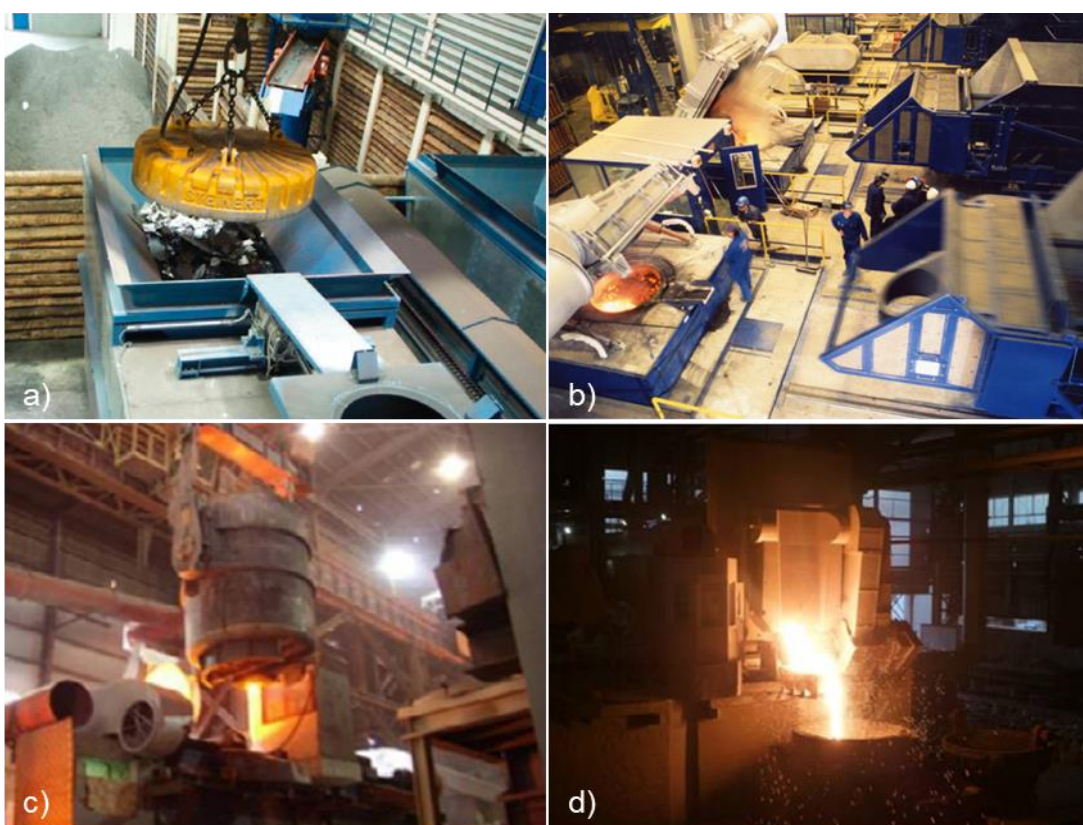
Como matéria prima a ser fundida, são utilizados no processo o retorno de ferro fundido, a sucata de aço e o gusa líquido. As proporções dependem da composição química da matéria prima, seu custo e disponibilidade, além da composição química desejada para a liga resultante.

O retorno de ferro fundido é composto principalmente pelo sistema de alimentação das fundições em molde de areia (canais e massalotes removidos após

o processo de desmoldagem) e por peças refugadas ao longo do processo. A sucata de aço é adquirida no mercado e pode apresentar diversas variações (oxidadas, sucata solta, sucata prensada). O equipamento analisado neste trabalho é abastecido majoritariamente pela sucata prensada, o que melhora a eficiência do carregamento pois proporciona uma maior densidade de carregamento. O gusa, por sua vez, é adquirido de uma siderúrgica próxima, ainda no estado líquido, sendo adicionado ao processo a uma temperatura média de 1250°C.

O carregamento do forno com a carga sólida é realizado pelo sistema de carros de carga com capacidade de 10 toneladas. Os carros são abastecidos com carga sólida através de eletroímãs instalados em pontes rolantes (Figura 7 a). Após o carregamento, é realizada a transferência da carga metálica para o interior do forno, onde se inicia o processo de fusão (Figura 7 b).

Figura 7 - Etapas do ciclo de uma corrida



a) Carregamento do carro de carga com material sólido; b) Translação e carregamento do forno de indução; c) Adição de carga líquida; d) Vazamento do metal líquido em painéis de transferência.

Fonte: Chaabet & Dötsch (2015).

A carga líquida (gusa líquido) é adicionada após a fusão da carga sólida, através de pontes rolantes (Figura 7 c). Após o final da fusão, o metal líquido é escorificado (remoção de areia e óxidos presentes na superfície do banho metálico), superaquecido até a temperatura de 1500°C e vazado em painéis de transferência (Figura 7 d).

### 4.3 Materiais e Métodos

Como método de levantamento de dados, realizou-se a coleta de 30 amostras aleatoriamente, entre a 1ª e a 115ª corrida produzida no forno, entre os meses de março e maio de 2022. As corridas selecionadas foram acompanhadas, registrando-se a quantidade dos materiais adicionados, o tempo de duração e a quantidade de energia consumida. Para cada corrida, calculou-se mínimo termodinâmico utilizando as entalpias específicas dos materiais indicados na Tabela 2, através da equação:

$$\text{Mínimo termodinâmico} = H_T = h_G * m_G + h_S * m_S + h_R * m_R$$

Sendo:

$H_T$  = Entalpia do sistema (kWh);

$h_G$  = Entalpia específica do gusa líquido (kWh/t);

$m_G$  = Quantidade de gusa líquido adicionado (t);

$h_S$  = Entalpia específica da sucata de aço (kWh/t);

$m_S$  = Quantidade de sucata de aço adicionado (t);

$h_R$  = Entalpia específica do retorno de ferro fundido (kWh/t);

$m_R$  = Quantidade de retorno de ferro fundido adicionado (t);

Tabela 2 - Entalpia específica à 1500°C

Sucata de aço, FeSi e Grafite	371 kWh/t
Retorno de ferro fundido	392 kWh/t

Fonte: Dötsch (2017).

Para o Gusa líquido, Dötsch (2017) afirma que é possível calcular sua entalpia específica ao se adotar um sistema idealizado de três substâncias Fe-C-Si, visto que

o Gusa não possui quantidades significativas de elementos de liga. Para o cálculo da entalpia de cada elemento, Pehlke *et al.* (1977) adota a seguinte equação:

$$h_T - h_{298} = A + BT \quad (\text{kcal/kg})$$

Sendo T a temperatura e  $h_{298}$  a entalpia à temperatura ambiente (298K), que para elementos puros é considerado zero (adotado como valor de referência para o início do processo). As constantes A e B para cada elemento estão contidas no **Anexo A**.

Como o gusa líquido é adicionado a uma temperatura média de 1250°C e superaquecido até 1500°C, a entalpia necessária para essa mudança de estado consiste na diferença da entalpia de cada elemento nessa mesma faixa de temperatura.

Ferro:

$$h_{\text{Fe}(1500)} - h_{\text{Fe}(1250)} = (A + B * 1500) - (A + B * 1250)$$

$$h_{\text{Fe}(1500)} - h_{\text{Fe}(1250)} = B(1500 - 1250)$$

$$h_{\text{Fe}(1500)} - h_{\text{Fe}(1250)} = 0,1969 * (250) = 49 \text{ kcal/kg}$$

Carbono:

$$h_{\text{C}(1500)} - h_{\text{C}(1250)} = (A + B * 1500) - (A + B * 1250)$$

$$h_{\text{C}(1500)} - h_{\text{C}(1250)} = B(1500 - 1250)$$

$$h_{\text{C}(1500)} - h_{\text{C}(1250)} = 0,4812 * (250) = 120 \text{ kcal/kg}$$

Silício:

$$h_{\text{Si}(1500)} - h_{\text{Si}(1250)} = (A + B * 1500) - (A + B * 1250)$$

$$h_{\text{Si}(1500)} - h_{\text{Si}(1250)} = B(1500 - 1250)$$

$$h_{\text{Si}(1500)} - h_{\text{Si}(1250)} = 0,2171 * (250) = 54 \text{ kcal/kg}$$

Na formulação de um balanço térmico é necessário a formulação do balanço de massa, pois a entalpia é uma função extensiva. Desta forma, as quantidades de cada elemento que compõe o material precisam ser conhecidas. A Tabela 3 contém a composição química especificada do gusa líquido utilizado no processo.

Tabela 3 - Composição química do Gusa Líquido

C	Si	Fe
4,2 %	1,2%	94,6%

Fonte: Dados fornecidos pela empresa.

Dessa forma, obteve-se a entalpia específica necessária para o aquecimento do gusa líquido no processo estudado:

$$h_G = h_{Fe(1500-1250)} * m_{Fe} + h_{C(1500-1250)} * m_C + h_{Si(1500-1250)} * m_{Si} \quad (\text{kcal/kg})$$

$$h_G = 49 * 0,946 + 120 * 0,042 + 54 * 0,012 = 52,3 \text{ kcal/kg}$$

Convertendo para as unidades utilizadas em processo obtém-se:

$$h_G = 52,3 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} * \frac{4,184\text{kJ}}{1\text{kcal}} * \frac{1000\text{kg}}{1\text{t}} * \frac{1\text{Wh}}{3600\text{J}} = 61 \text{ kWh/t}$$

Após a obtenção do mínimo termodinâmico, calculou-se a eficiência energética de cada corrida, ao se comparar o consumo ideal com o consumo real obtido no processo, conforme a seguinte equação:

$$\text{Eficiência Energética (\%)} = \frac{\text{mínimo termodinâmico (kWh)}}{\text{energia fornecida (kWh)}} \times 100$$

Os valores obtidos de Mínimo Termodinâmico e da Eficiência Energética para cada corrida foram adicionados à tabela de dados.

Com posse dos dados, utilizou-se o *software* Minitab para calcular as estimativas de localização (média e mediana), a estimativa de variabilidade (desvio padrão) e para plotar o histograma do conjunto de dados de eficiência energética, calculados para cada corrida.

Por fim, listou-se algumas boas práticas consolidadas que podem direcionar futuros projetos com foco na melhoria da eficiência energética.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 contém os dados das corridas do forno de indução tipo cadinho, coletados através do processo de amostragem.

Tabela 4 - Dados de amostras das corridas do forno de indução tipo cadinho

CORRIDA	GUSA (kg)	SUCATA (kg)	RETORNO (kg)	ENERGIA CONSUMIDA (kWh)	TEMPO (min)	MÍN. TERMODINÂMICO (kWh)	EFICIÊNCIA
5	6.700	5.210	15.300	11.481	134	8.337	73%
6	7.928	3.420	16.410	10.995	92	8.183	74%
7	7.000	8.420	11.330	10.743	121	7.990	74%
11	11.260	12.410	2.060	9.224	116	6.095	66%
12	7.120	7.430	14.200	12.131	133	8.755	72%
16	8.652	5.520	13.310	10.527	102	7.791	74%
21	12.563	5.310	10.100	8.467	103	6.692	79%
22	9.096	7.230	13.530	12.039	165	8.538	71%
23	9.440	8.180	10.490	10.890	105	7.720	71%
24	4.816	5.000	18.190	13.136	165	9.278	71%
26	6.829	7.170	12.860	11.215	249	8.116	72%
27	5.000	5.080	17.510	12.098	203	9.052	75%
31	13.000	6.310	8.480	9.120	132	6.454	71%
35	10.500	8.030	9.140	10.621	179	7.199	68%
37	8.407	7.530	12.240	11.409	119	8.102	71%
38	4.100	7.120	15.100	11.919	153	8.810	74%
46	13.100	14.760	0	8.850	107	6.271	71%
47	10.253	7.460	9.730	9.267	129	7.204	78%
48	8.100	5.150	14.910	10.792	96	8.247	76%
51	8.430	6.370	16.100	12.202	241	8.763	72%
54	7.315	7.940	13.260	11.449	126	8.588	75%
55	8.130	5.210	13.500	10.232	136	7.718	75%
57	14.854	8.110	6.220	9.026	99	6.349	70%
68	9.000	8.140	10.120	10.276	202	7.533	73%
78	6.300	5.100	16.210	11.594	88	8.629	74%
83	8.447	8.210	11.450	10.601	110	8.047	76%
86	11.206	8.100	9.610	9.256	83	7.452	81%
88	4.962	5.010	17.430	12.994	194	8.992	69%
89	7.100	7.110	13.770	11.879	260	8.467	71%
111	7.743	7.540	12.510	10.647	143	8.171	77%

Fonte: De autoria própria.

Na Tabela 5 estão contidas as estimativas de localização e variabilidade calculadas para o conjunto de dados referente à coluna eficiência.

Tabela 5 - Estimativas de localização e variabilidade da Eficiência Energética

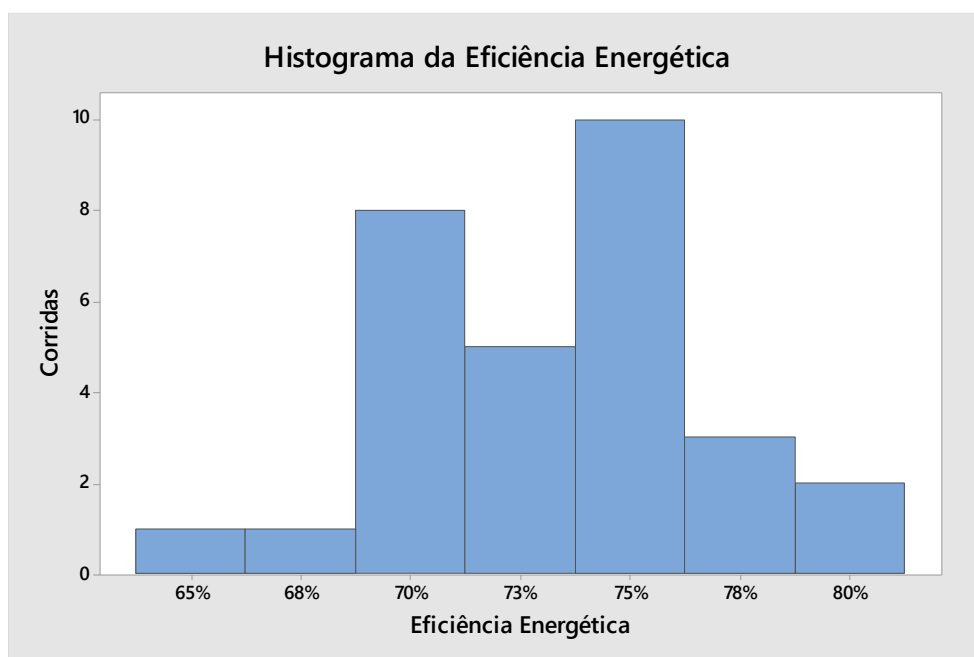
Média	Mediana	Desvio Padrão
73,3%	73,6%	3,2%

Fonte: De autoria própria.

Os valores de média e mediana são próximos, o que indica que o conjunto de dados não possui valores discrepantes (*outliers*).

Analisando desvio padrão encontrado juntamente com a distribuição dos dados (Gráfico 3), é possível perceber uma grande dispersão nos resultados da eficiência energética do conjunto amostral. Essa variação era esperada, uma vez que as corridas selecionadas na amostragem estavam sujeitas às diversas variáveis de processo, como paradas do equipamento durante a fusão, atrasos no carregamento, tempos prolongados de tampa aberta, desgaste do revestimento refratário, entre outros.

Gráfico 3 - Distribuição dos dados calculados de Eficiência Energética



Fonte: De autoria própria.

Analisando os resultados obtidos pela média e comparando com os valores de referência (80%) apresentados por Dötsch (2017), pode-se observar que apesar do forno estudado apresentar uma alta eficiência energética, existe ainda uma possibilidade de otimização de aproximadamente 9,1%.

Schmitz e Trauzeddel (2014) afirmam que é possível reduzir perdas operacionais e aumentar a eficiência energética de fornos fusores à indução ao se adotar algumas técnicas no preparo das matérias primas utilizadas no carregamento. Como propostas de melhoria para o equipamento analisado, foram selecionadas duas boas práticas que apresentam um maior potencial de otimização:

- **Limpeza da carga metálica:** O retorno e a sucata usados como matéria prima devem ser os mais limpos possível. As presenças de sílica em grandes quantidades causam a formação de escória com alto ponto de fusão, que se adere a superfície do refratário, provocando a redução do volume útil do cadinho com o passar do tempo. Esse aumento da escória também aumenta o tempo de escorificação (atividade de remoção de escória do forno), elevando assim o tempo de tampa aberta e as perdas por convecção e radiação. Outro fator ainda relevante quanto a presença de areia é que sua entalpia é consideravelmente maior que a entalpia do ferro fundido. A presença de 25 kg de areia para cada tonelada carregada, pode aumentar o consumo de energia específica em 12,5 kWh/t (SCHMITZ & TRAUZEDDEL, 2014). Jateamentos abrasivos podem ser aplicados para a remoção de areia e de óxidos presentes na superfície dos retornos. Este processo garante uma redução na quantidade de escória gerada e uma redução imediata no consumo específico do forno (DIVISION OF ENERGY, 2006).
- **Aumento da densidade de carga:** As cargas utilizadas como matéria prima devem possuir a maior densidade possível. Devido ao acoplamento magnético, quanto mais densa a carga menor será a perda do campo eletromagnético em espaços vazios e, conseqüentemente, menor será o consumo de energia. Schmitz e Trauzeddel (2014) perceberam que, ao reduzir a densidade em 0,5 t/m<sup>3</sup>, houve um aumento no consumo específico de 25 kWh/t. Equipamentos de quebra de canais podem ser aplicados para

aumentar a densidade de carregamento do retorno utilizado no processo.

As estimativas de ganhos de eficiência energética através da aplicação destas melhorias no forno analisado estão contidas na Tabela 6.

Tabela 6 - Ganhos estimados de eficiência energética

Melhoria	Ganho	Redução (kWh/t)	Redução (kWh)	Aumento da eficiência energética
Limpeza de carga	Redução de 25 kg/t de areia no retorno.	12,5	152,1	1%
Aumento da densidade de carga	Aumento de 0,5t/m <sup>3</sup> na densidade de carga do retorno.	25	304,2	2,1%

Fonte: De autoria própria.

As boas práticas analisadas apresentam um potencial de otimização de 4,2% na média da eficiência energética, considerando os mesmos ganhos alcançados nas referências adotadas. Os valores utilizados nos cálculos da quantidade de material na carga e no consumo de energia, são as médias dos valores obtidos das corridas selecionadas em amostragem.

## 6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

### 6.1 Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo analisar a eficiência energética de um forno fusor do tipo cadinho operando na produção do ferro fundido e encontrar o campo de oportunidades para desenvolvimentos de projetos de melhoria.

Através da revisão bibliográfica, foi possível definir um modelo de análise usando as propriedades termoquímicas dos materiais utilizados como matéria prima para calcular a quantidade de energia ideal necessária na mudança do estado termodinâmico (mínimo termodinâmico).

Através dos resultados encontrados, observou-se que a eficiência energética média do equipamento é de 73,3% e que o mesmo apresenta uma oportunidade de otimização, visto que fornos de indução tipo cadinho com características similares ao forno analisado tem capacidade de operar com até 80% de eficiência (DÖTSCH, 2017). As boas práticas levantadas apresentam um potencial de otimização de 4,2% na média da eficiência energética para o forno analisado, porém estudos mais detalhados devem ser conduzidos para avaliar a viabilidade de implantação de cada proposta.

### 6.2 Recomendações

Seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar análises de viabilidade das melhores práticas sugeridas neste trabalho;
- Realizar experimentos de mistura para verificar a proporção ideal de material para carregamento do forno.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARASU, M; JEFFREY, L. R. **Energy consumption studies in cast iron foundries**. Kolkata, India, 2009.
- BIOLO, S. M. **Reuso do resíduo de fundição areia verde na produção de blocos cerâmicos**. Escola de Engenharia. Porto Alegre, RS, 2005.
- CASTRO, P. C. de; FILHO E. D. B.; CASOTTI, B. P. **Indústria de fundição: situação atual e perspectivas**. BNDES Setorial. 2010.
- CHAABET, M; DÖTSCH, E. **Inductive melting in steelworks**. Induction Technology: Heat processing. 2015.
- CHEN, Y. *et al.* **Heat transfer modelling of rail thermite welding**. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part F-journal of Rail and Rapid Transit, 2006.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. 2.ed. Vol. 2, McGraw-Hill do Brasil, 1986.
- DIVISION OF ENERGY (US). State of Wisconsin. Focus on energy: ENERGY BEST PRACTICE. **METALCASTING INDUSTRY**. Wisconsin, US, 2006.
- DÖTSCH, E. **Use of thermochemical data in inductive melting**. Induction Technology: Heat processing. 2017.
- EPE [Empresa de Pesquisa Energética] **Balanco Energético Nacional (BEN) 2022: Ano base 2021**. Disponível em < <https://www.epe.gov.br> >. Acesso em jun/2022.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4.ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- HERMANN, S; KROES, J. **Energy efficiency using Induction Furnaces**: Hamar. 2010.
- KLEIN NETO, A. *et al.* **Fornos elétricos a indução**. Eletrobras/ Procel (Manual de Conservação de Energia Elétrica), Rio de Janeiro, 1989.
- Medium-frequency coreless induction furnaces. Otto Junker, 2020. Disponível em: <<https://www.otto-junker.com>> . Acesso em mar/2022.
- OWUSU, P. A; Asumadu-Sarkodie, S. **A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation**. Cogent Engineering, 2016.
- PEHLKE, R D *et al.* **BOF Steelmaking**. Process Technology Division, Iron and Steel Society of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, 1977.
- RICHARDSON, R. J. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3.ed. São Paulo: Atlas, 1999.

SCHMITZ, W; TRAUZEDDEL, D. **The Melting, Holding and Pouring Process - Energy and Process - Related Aspects.** World Foundry Congress, 2014.

VAN WYLEN, G. T; SONTAG. **Fundamentos da termodinâmica Clássica.** 8.ed. Blucher, 2018.

YIN. R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos.**3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

## ANEXO A – TABELA DE ENTALPIA DOS ELEMENTOS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Material	Enthalpy Changes Due to Temperature				
	298 to 1000K		1400 to 2000K		
	Mean specific heat	$H_{1000}-H_{298}$ Kcal/Kg	$H_T-H_{298} = A + BT, \text{Kcal/Kg}$		
		A	B		
Al	0.390	274	- 7.2	0.2813	a
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.261	183	- 8.4	0.3200	b
C	0.335	235	-260.2	0.4812	c
CO	0.264	185	-124.9	0.3043	d
CO <sub>2</sub>	0.258	181	-147.4	0.3217	d
CaC <sub>2</sub>	0.294	207	-	-	a
CaCO <sub>3</sub>	0.262	184	-	-	e
CaF <sub>2</sub>	0.244	171	- 12.4	0.3060	-
CaO	0.210	147	-104.0	. 0.3200	b
CaS	0.210	147	-104.0	0.3200	f
Fe	0.148	104	- 46.3	0.1969	-
Fe <sub>3</sub> C	0.157	110	-	-	-
FeO	0.184	129	- 17.4	0.2366	-
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0.217	153	-	-	e
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> fume	0.214	150	- 68.2	0.2173	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> slag	0.214	150	-114.5	0.3200	b
FeSi	0.161	113	-	-	e
H <sub>2</sub>	3.490	2450	-1582.7	3.9227	d
H <sub>2</sub> O	0.599	420	-330.8	0.6461	d
L.O.I.	0.258	181	-147.4	0.3217	f
MgO	0.268	188	+ 5.0	0.3200	b
MgCO <sub>3</sub>	0.310	218	-	-	e
Mn	0.155	109	- 34.3	0.2002	-
MnO	0.169	119	-167.6	0.3200	-
N <sub>2</sub>	0.261	183	-124.6	0.3016	d
O <sub>2</sub>	0.241	170	-111.9	0.2768	d
O	0.250	180	-108.0	0.3200	f
P <sub>2</sub>	0.136	95	- 48.2	0.1431	d
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.251	176	-108.0	0.3200	f
S <sub>2</sub>	0.133	93	- 47.5	0.1401	d
Si	0.207	145	+369.7	0.2171	-
SiC	0.249	175	-	-	e
SiO <sub>2</sub>	0.256	180	- 23.9	0.3200	b

Remarks: a. completely oxidized in furnace  
 b. liquid specific heat and heat of fusion estimated  
 c. graphite d. gas e. decomposes in furnace  
 f. estimated.

Fonte: Pehlke et al. (1977)