



## AValiação Ambiental da Substituição de um Forno Rotativo a Óleo por um Forno Elétrico à Indução em Fundição<sup>1</sup>

Carlos Alberto Mendes Moraes<sup>2</sup>

Gustavo Coronet<sup>3</sup>

Daiane Calheiro<sup>4</sup>

Daniel Canello Pires<sup>4</sup>

Cynthia Fleming Batalha da Silveira<sup>5</sup>

Gabriela Malgarin de Lima<sup>6</sup>

Giovani Lorscheitter<sup>7</sup>

Rodrigo Crippa Gaspar<sup>8</sup>

### Resumo

A fabricação de peças por fundição é historicamente um processo com grande impacto ambiental. Considerando-se a nova realidade ambiental de buscar a redução dos impactos causados pelas atividades industriais, é preciso fazer com que o processo de fundição se torne menos nocivo ao meio ambiente, o que passa pela utilização de fornos de fusão mais viáveis sob a ótica ambiental. Dentre os fornos usados em empresas de fundição encontram-se o forno rotativo a óleo, que usa óleo BTE derivado do petróleo como combustível e o forno elétrico a indução, que utiliza energia elétrica para a indução de correntes de Foucault que causam efeito joule na carga metálica, levando-a a fusão. A viabilidade ambiental da substituição do forno rotativo a óleo pelo forno elétrico a indução, no processo de fusão de uma fundição da região do Vale dos Sinos, para obtenção de ferro fundido líquido foi avaliada no sentido de mostrar se a empresa tomou a decisão correta. A Análise do Ciclo de Vida é a ferramenta ambiental indicada para esse estudo, permitindo que sejam analisados os dados de entrada e saída dos processos envolvidos, e que sejam estabelecidos os aspectos e impactos ambientais que estão relacionados à operação de ambos os tipos de fornos. A aplicação da metodologia de Análise de Ciclo de vida para cada um dos tipos de fornos envolvidos e a posterior comparação dos resultados permitiram determinar que o forno elétrico a indução é a opção mais viável por apresentar menores impactos ambientais.

**Palavras-chave:** Análise do ciclo de vida; Forno rotativo; Forno indução; Avaliação ambiental.

### ENVIRONMENTAL EVALUATION OF THE SUBSTITUTION OF OIL ROTATIVE FURNACE BY ELECTRIC INDUCTION FURNACE IN FOUNDRY

#### Abstract

The production of mechanical components via foundry is historically known as a high environmental impact process. Considering the new environmental agenda, meaning that searching for the reduction of impacts caused by industrial activities and whole society, it is been highly necessary. In the case of foundry, the use of a melting furnace more viable from the point of view of environment has become an important example. Between the furnaces used in foundries there are, the oil rotative furnace, which uses BTE oil obtained from petroleum as fuel, and also the electric induction furnace, which uses electrical energy to generate the Foucault currents causing the joule effect on the metallic material and melting it. The environmental viability for the substitution of the oil furnace by the induction furnace in the melting process from a company located in the Vale dos Sinos, to obtain liquid cast iron was evaluated to certify if the company has done the right choice. The life cycle assessment (LCA) is an environmental tool indicated to this case, which permitted to analyze the input and output data from the related processes, and the establishment of environmental aspects and impacts which are related to the operation of both furnaces. The application of the methodology of LCA for each of the furnaces and later on comparison between them permitted to determine that the electric induction furnace is the best option because it presents lower environmental risks.

**Key words:** Environmental evaluation; Rotative furnace; Induction furnace; Life cycle assessment.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Membro da ABM, Prof. Dr. – Progr. Pós Graduação em Eng. Civil e em Mecânica - Núcleo de Caracterização de Materiais (NucMat) – Univ. Vale do Rio dos Sinos/Unisinos, São Leopoldo, RS. e-mail: cmoraes@unisinos.br.

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico -NucMat - UNISINOS. e-mail: gcoronet@terra.com.br.

<sup>4</sup> Gestor Ambiental, Mestrando – PPG em Engenharia Civil -, NucMat – UNISINOS. dcalheiro@gmail.com; :dpires88@hotmail.com.

<sup>5</sup> Ms. Bióloga, Pesquisadora – NucMat – UNISINOS. e-mail: cynthiafbs@hotmail.com.

<sup>6</sup> Graduanda em Gestão Ambiental - NucMat – UNISINOS. e-mail: gabiml21@hotmail.com.

<sup>7</sup> Diretor da empresa Metalurgica Lorscheitter Ltda. e-mail: geovani@lorscheitter.com.br.

<sup>8</sup> Técnico da empresa Metalurgica Lorscheitter Ltda. e-mail: rccgaspar@lorscheitter.com.br.

## 1 INTRODUÇÃO

Existe hoje uma preocupação crescente com a questão ambiental. Cada vez mais se ouve falar em sustentabilidade, reciclagem, diminuição de uso dos recursos naturais e redução dos resíduos sólidos, efluentes e emissões atmosféricas. Décadas de uso irresponsável de recursos naturais e emissões descontroladas causaram seqüelas ao planeta provocando, entre outros impactos, alterações climáticas. O processo de fabricação de peças metálicas por fundição é historicamente um processo com grandes problemas ambientais, como a falta de reciclagem, o descarte inapropriado da areia contaminada usada nos moldes para vazamento das peças, a grande quantidade de resíduos sólidos gerados no processo e o alto nível de emissões atmosféricas. Sendo assim, fundições costumam causar grandes impactos ambientais e usar muitos recursos naturais não renováveis, como combustíveis derivados de petróleo e matérias-primas derivadas do minério de ferro.

Dentro do processo de fundição, um dos grandes geradores de aspectos e impactos ambientais são os fornos de fusão, responsáveis por fundir o material metálico para que seja realizado o vazamento dentro dos moldes. Esses fornos possuem alta demanda energética, devido às altas temperaturas envolvidas no processo de fusão, energia que pode ser proveniente de combustíveis derivados de petróleo (óleo combustível), minerais (coque) e energia elétrica.

O objetivo deste trabalho visa realizar uma análise comparativa considerando a avaliação ambiental dos fornos: Rotativo a óleo e o Elétrico a Indução utilizados numa empresa de fundição da região do Vale do Rio dos Sinos, através do uso da ferramenta de Análise do Ciclo de Vida.

O forno rotativo a óleo é um tipo de forno de fusão que utiliza o calor proveniente da combustão da mistura de óleo combustível derivado do petróleo (óleo BTE com baixo teor de enxofre) com oxigênio puro, para aquecer a carga metálica até seu ponto de fusão, obtendo-se assim a liga metálica desejada para a produção de peças fundidas. Por possuir uma atmosfera rica em oxigênio, este tipo de forno tende a provocar grandes taxas de oxidação do banho metálico, levando a geração de grandes quantidades de escória. Nessas condições é comum a perda de grandes quantidades de carbono, manganês e silício, o que faz com que o uso de ferro gusa como matéria-prima seja praticamente indispensável.<sup>(1)</sup>

Já o forno elétrico a indução, de acordo com Souza,<sup>(2)</sup> é uma bobina que envolve o cadinho de forno de fusão. Esta bobina faz com que haja circulação de corrente elétrica, formando um campo eletromagnético ao redor do cadinho. Considerando-se que exista uma carga metálica no interior dessa bobina, esta será sede do aparecimento de correntes parasitas denominadas correntes de Foucault, que serão dissipadas por efeito Joule, provocando o aquecimento da carga metálica contida no interior do cadinho. Normalmente a oxidação do banho metálico é bastante baixa nesse tipo de forno, devido à pequena área do banho que fica exposta ao oxigênio em relação ao volume. A escória formada é geralmente pouco reativa, em parte devido à sua baixa temperatura, pois é aquecida somente pela irradiação de calor proveniente do banho metálico. O ajuste final da composição química e a desoxidação do banho são facilmente conseguidos com a adição de ferro ligas adequados. A baixa oxidação do banho metálico leva a uma conseqüente baixa taxa de descarbonetação, o que viabiliza o uso de sucata de aço como alternativa de matéria-prima. Nesse tipo de forno opera-se tipicamente com cargas

de 60% de sucata de aço e 40% de retorno de ferro fundido, proveniente de sobras de processo e peças refugadas no controle de qualidade.

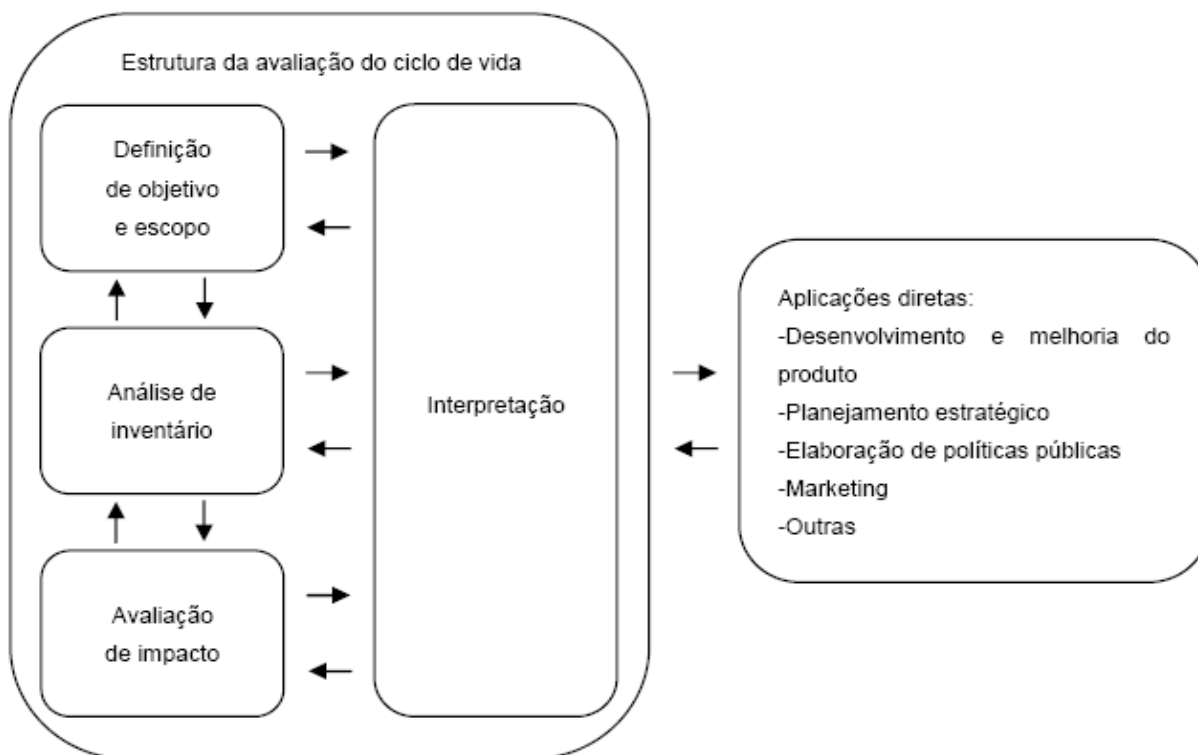
Portanto, o forno rotativo a óleo, por usar grandes quantidades de combustível derivado de petróleo, gera um nível muito alto de emissões atmosféricas. A geração de escória em um forno rotativo a óleo é visivelmente maior do que a encontrada em um forno elétrico a indução. Por outro lado, o consumo de energia elétrica é muito maior em um forno elétrico a indução do que em um forno rotativo a óleo.

Com a necessidade iminente de tornar o processo de fundição mais limpo, e a importância de se ter um processo cada vez mais competitivo do ponto de vista econômico, gera-se o interesse em determinar qual dos tipos de fornos é mais viável sob o ponto de vista ambiental, sendo a Análise de Ciclo de Vida (ACV) a ferramenta indicada para a realização dessa avaliação.

Segundo Chehebe,<sup>(3)</sup> a Análise do Ciclo de Vida é uma técnica para avaliação dos aspectos ambientais e dos impactos potenciais associados a um produto, compreendendo etapas que vão desde a retirada da natureza das matérias primas que entram no sistema produtivo (berço) à disposição do produto final (túmulo).

Por estudar os aspectos e impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida do produto, a ACV é considerada uma análise “do berço ao túmulo”. As categorias gerais de impactos ambientais que precisam ser consideradas incluem o uso de recursos, a saúde humana e as consequências ecológicas.<sup>(4)</sup>

Para a aplicação da ferramenta ACV, de acordo com a norma NBR ISO 14040,<sup>(4)</sup> deve-se definir o objetivo e o escopo do trabalho, desenvolver uma análise do inventário, uma avaliação de impactos e a interpretação dos resultados. Conforme apresentado na Figura 1.



**Figura 1:** Fases que compõem a ACV.<sup>(4)</sup>



## 2 METODOLOGIA

Para a aplicação da ferramenta de ACV realizada nesse trabalho, a metodologia adotada foi a proposta por Chehebe,<sup>(3)</sup> que é a principal referência bibliográfica brasileira para esse tipo de estudo, estando de pleno acordo com a norma NBR ISO 14040.<sup>(4)</sup> A metodologia de avaliação de aspectos e impactos ambientais adotada para a realização desse estudo segue os critérios de avaliação de aspectos e impactos ambientais utilizados no Sistema de Gestão Ambiental (SGA) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos).<sup>(5)</sup>

Foram feitas visitas freqüentes à empresa de fundição que opera ambos os fornos que são objetos desse estudo, com o intuito de conhecer as instalações e obter boa familiaridade com os processos de funcionamento de ambos, podendo assim compreender quais seriam os reais objetivos desse estudo, quais seriam os dados de entrada e saída envolvidos e quais seriam os aspectos e impactos potenciais relacionados com o funcionamento dos dois tipos de fornos.

A aplicação da metodologia de ACV nesse estudo engloba todas as fases descritas por Chehebe,<sup>(3)</sup> que são elas: objetivo e escopo, análise do inventário, avaliação de impacto e interpretação dos resultados. Devido à natureza comparativa desse trabalho, as fases de análise do inventário e avaliação de impactos foram divididas em duas seções, uma para cada tipo de forno avaliado, enquanto as fases de objetivo e escopo e interpretação dos resultados estão relacionadas aos processos dos dois fornos.

## 3 DESENVOLVIMENTO DAS FASES DA ACV

Para uma melhor compreensão de como foram desenvolvidas as fases da ACV, estas estão divididas em três tópicos, sendo que na descrição das fases alguns resultados são apresentados.

### 3.1 Objetivo e Escopo

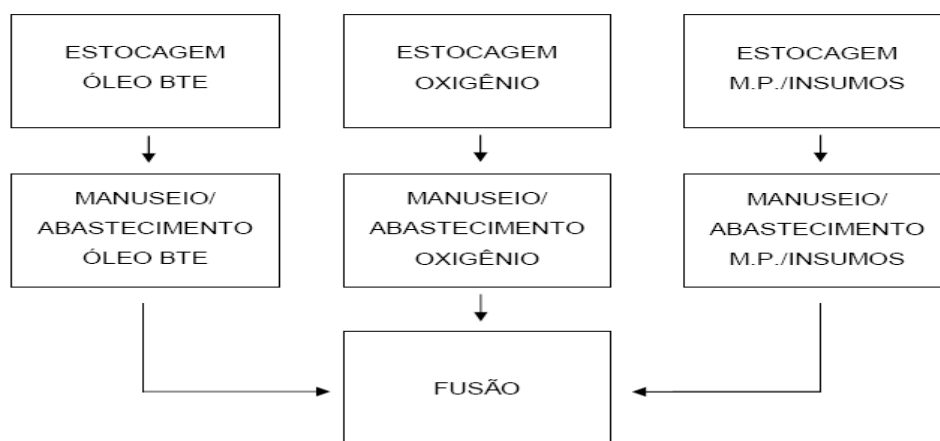
Este estudo de ACV tem como objetivo primordial servir de embasamento para a determinação de qual o melhor tipo de forno sob o aspecto ambiental, o forno elétrico a indução ou o forno rotativo a óleo, auxiliando na análise da viabilidade da substituição do forno rotativo a óleo por fornos elétricos a indução, contribuindo assim para a redução dos impactos ambientais associados ao processo de fundição.

Ambos os tipos de fornos produzem o mesmo produto, ferro fundido no estado líquido, dos tipos nodular ou cinzento, para uso na fabricação de peças fundidas pela subsequente operação de vazamento do metal fundido em moldes previamente preparados para essa finalidade. Como a capacidade de carga dos dois tipos de fornos é diferente, e os dois fornos a indução não possuem a capacidade de trabalhar em paralelo devido à configuração do módulo de controle, ou seja, somente um forno elétrico a indução pode ser energizado por vez, a comparação direta entre as entradas e saídas pertinentes a corridas dos dois fornos não é viável, o que demanda a adoção de uma unidade funcional que viabilize essa comparação. Assim sendo, foi adotado como base para essa ACV, as entradas e saídas pertinentes a fusão de uma tonelada de ferro fundido, tanto para o forno rotativo a óleo, quanto para o forno elétrico a indução.

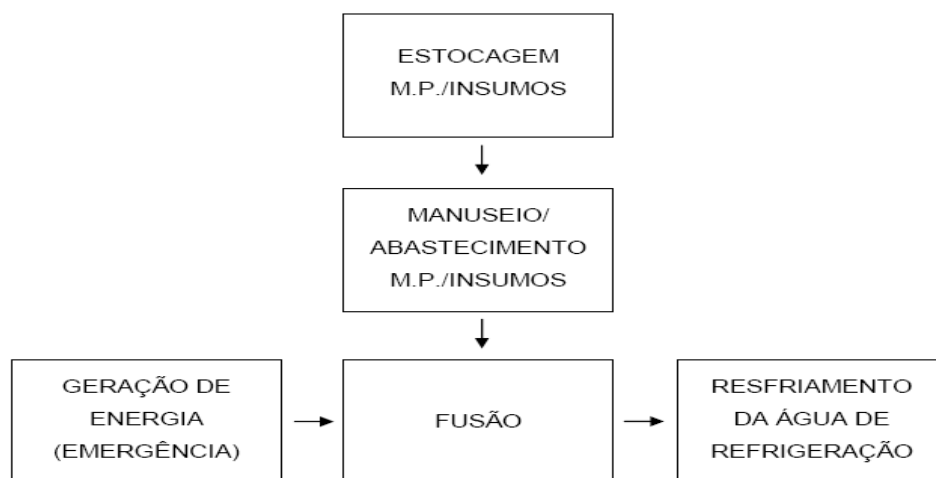
Por restrições impostas ao tempo hábil e aos recursos disponíveis para a realização desse estudo, as fronteiras dessa ACV foram definidas de maneira a

contemplarem apenas as etapas que acontecem dentro da empresa onde estão localizados os fornos, ou seja, a fronteira da ACV é a própria fronteira da empresa. A aplicação dessa fronteira restringe, mas não invalida a aplicação desta ACV, pois questões ambientais importantes como diminuição no uso direto de recursos naturais renováveis e não renováveis, níveis de emissões atmosféricas oriundas dos fornos de fusão e geração de resíduos sólidos, dentre outros, ainda poderão ser analisados, levando a um direcionamento bastante preciso de qual é realmente o forno mais interessante sob o ponto de vista ambiental.

Os fluxogramas mostrados nas Figuras 2 e 3 demonstram as etapas compreendidas dentro dos limites da fronteira para o forno rotativo a óleo e elétrico a indução, respectivamente.



**Figura 2:** Fluxograma relativo ao funcionamento do forno rotativo a óleo.



**Figura 3:** Fluxograma relativo ao funcionamento do forno elétrico a indução.

### 3.2 Análise do Inventário

Conforme citado no objetivo da ACV, foi desenvolvido um inventário do ciclo de vida para cada um dos processos relativos a um dos tipos de fornos analisados. Devido a indisponibilidade técnica para realização de medições de emissões gasosas no forno rotativo, a análise do inventário requer que sejam calculados os dados teóricos de emissões atmosféricas.

#### 3.2.1 Cálculo das emissões atmosféricas no forno rotativo

Os combustíveis industriais, dentre os quais se inclui o óleo BTE, são todos formados por composições dos combustíveis elementares existentes na natureza,



resultando das diferentes proporções dessa combinação. Garcia<sup>(6)</sup> afirma que os combustíveis elementares presentes são o carbono (C), o hidrogênio (H) e o enxofre (S).

Existem duas formas básicas de reações de combustão. Afirma-se que a combustão é completa quando o combustível é queimado em sua totalidade, levando os reagentes ao seu grau de oxidação máxima. A combustão incompleta ocorre quando há queima incompleta dos combustíveis elementares, levando a perda de carga térmica e a emissões de gases mais nocivos como o monóxido de carbono (CO), o trióxido de carbono (SO<sub>3</sub>, também conhecido como óxido sulfúrico) que reage com o vapor resultando em ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).<sup>(6)</sup>

Para que possa ser determinada a quantidade de oxigênio por estequiometria para a realização do processo de combustão, é preciso conhecer a análise elementar do combustível, ou seja, qual o percentual de cada combustível elementar em um quilograma do combustível utilizado. O óleo BTE possui a seguinte análise elementar:<sup>(6)</sup> 87% de carbono (C); 12% de hidrogênio (H) e 1% de enxofre (S). Sendo assim, pode-se calcular a massa de oxigênio estequiométrico (MO<sub>2</sub>) necessário, pela seguinte equação:<sup>(6)</sup>

$$MO_{20} = 2,67 \times C + 8 \times H + 1 \times S - O_2 \quad \text{Equação 1}$$

Onde, O<sub>2</sub> é a quantidade de oxigênio presente na composição do combustível.

Substituindo-se os valores na equação 1, encontra-se a necessidade de oxigênio estequiométrico de 3,38 kg/kg<sub>combustível</sub>.

Para que seja determinado o excesso usado no processo de combustão do forno rotativo a óleo, é necessário que seja determinada a massa de oxigênio realmente usado no processo de combustão.

Da análise do inventário da empresa, sabe-se que são consumidos na fusão de uma tonelada de ferro fundido, 171,5 m<sup>3</sup> de oxigênio e 658 L de óleo BTE. Sabendo-se que o peso específico do óleo BTE é 0,86 kg/L, pode-se afirmar que são usados 57,08 kg de óleo BTE na fusão de uma tonelada de ferro fundido. Dividindo-se o consumo total de oxigênio pela massa de óleo utilizado, pode-se afirmar que são utilizados 3m<sup>3</sup> de oxigênio por quilograma de óleo. Assumindo-se que o peso específico do oxigênio é 1,354 kg/m<sup>3</sup>, pode-se afirmar que a massa total de oxigênio utilizada no processo de fusão de uma tonelada de ferro fundido no forno rotativo é 4kg de oxigênio. Foi constatado através dos cálculos um excesso de oxigênio de 0,18%, ou 18%, levando-se em consideração a faixa de excesso sugerido por Garcia,<sup>(6)</sup> de que o excesso deveria ficar compreendido entre 15% e 20%, há condições teóricas de se obter combustão completa no processo de queima do forno rotativo, porém durante o processo de fusão observa-se a geração de fumaça negra

abundante, o que é uma característica de processos de combustão incompleta. Este estudo baseia-se na hipótese de que haja combustão completa no forno rotativo a óleo, mas recomenda que seja feita uma análise real das emissões para que seja aferida a presença de monóxido de carbono, trióxido de enxofre e fuligem entre as emissões do forno rotativo a óleo, podendo-se assim fazer as correções necessárias para que seja obtido o processo de combustão completa. Também através de equações estequiométricas e cálculos baseado em Garcia<sup>(6)</sup> esta combustão gerou 192,35 kg de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), 11,4kg dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e 61,64 kg de água.

### 3.2.2 Análise do inventário para o forno rotativo a óleo

Para o desenvolvimento do inventário do ciclo de vida do forno rotativo a óleo foram usados dados reais do forno em operação, obtidos através do levantamento do consumo de matérias-primas e insumos utilizados durante os 12 meses do ano de 2008, período em que a empresa contava somente com o forno rotativo para a produção de suas peças. Por existirem variações pertinentes ao processo de fusão no forno rotativo, como variações no uso de elementos de liga, refratário, matéria prima, combustível e comburente, os valores apresentados por tonelada de ferro fundido processado são valores médios que representam, com precisão aceitável, as quantidades envolvidas no processo de fusão desse tipo de forno.

A Tabela 1 demonstra o diagrama de blocos que quantifica as principais entradas e saídas relacionadas com o processo de fusão no forno rotativo a óleo.

**Tabela 1:** Diagrama de blocos da fusão em forno rotativo a óleo, ano 2008

FUSÃO EM FORNO ROTATIVO A ÓLEO				
ENTRADAS		PROCESSO	SAÍDAS	
MATÉRIAS-PRIMAS:	QUANTIDADES		PRODUTO:	QUANTIDADES
Ferro Gusa	0,72t	FUSÃO FORNO ROTATIVO A ÓLEO	Ferro Fundido Líquido	1t
Retorno Ferro Fundido	0,48			
Carburante	0,00438t			
Ferro Cromo	0,00117t			
Ferro Silício 75	0,00716t			
INSUMO:	QUANTIDADES		RESÍDUO:	QUANTIDADES
Óleo BTE	0,0658m <sup>3</sup>		Emissões Atmosféricas	CO <sub>2</sub> = 0,192t SO <sub>2</sub> =0,0114t H <sub>2</sub> O=0,061t
Oxigênio Líquido	171,5m <sup>3</sup>		Escória (resíduo sólido)	0,2t
Refratário	0,000922t			
Energia Elétrica	11,04KWh			

### 3.2.3 Análise do inventário para o forno elétrico a indução

Assim como no caso do forno rotativo a óleo, para a análise do inventário do forno elétrico a indução foram utilizados dados reais de entradas e saídas relativos ao processo de fusão de cargas metálicas para produção de ferro fundido nesse equipamento, tendo como base as quantidades de matéria-prima e insumos consumidos pelo forno elétrico a indução durante os 12 meses do ano de 2009, período em que a empresa onde o estudo foi realizado usou, sem mensurar os ganhos ambientais, predominantemente o forno elétrico a indução.

A Tabela 2 demonstra o diagrama de blocos que quantifica as principais entradas e saídas envolvidas no processo de fusão no forno elétrico a indução.

**Tabela 2:** Diagrama de blocos da fusão em forno elétrico a indução, ano 2009

FUSÃO EM FORNO ELÉTRICO A INDUÇÃO				
ENTRADAS		PROCESSO	SAÍDAS	
MATÉRIAS-PRIMAS:	QUANTIDADES		PRODUTO:	QUANTIDADES
Sucata de Aço	0,6t	FUSÃO FORNO ELÉTRICO A INDUÇÃO	Ferro Fundido Líquido	1t
Retorno Ferro Fundido	0,4t			
Carburante	0,123t			
Ferro Cromo	0,00052t			
Ferro Silício 75	0,00567t			
INSUMO:	QUANTIDADES		RESÍDUO:	QUANTIDADES
Refratário	0,0026t		Emissões Atmosféricas	-
Energia Elétrica	516KWh		Escória (resíduo sólido)	0,0284t



### 3.3 Avaliação de Impacto

A metodologia aplicada atribui os pesos de 1 a 4, na ordem crescente do grau de impacto potencial, ou seja, 1 para o menor grau de impacto potencial e 4 para o maior grau de impacto potencial. Para cada impacto ambiental potencial, foram atribuídos pesos nas seguintes categorias:

- abrangência
- frequência.

Uma vez que os pesos para cada um dos três quesitos tenham sido atribuídos, estes são somados resultando em um número que pode variar de 3 a 12.

Esse número assinala o grau de importância de um impacto potencial, sendo usado para definir o quão significativo é esse impacto potencial. Para a realização desse estudo foram usados os seguintes critérios:

- Grau de importância 3: O impacto potencial é considerado desprezível.
- Grau de importância de 4 a 6: O impacto potencial é considerado moderado.
- Grau de importância de 7 a 12: O impacto potencial é considerado crítico.

No desenvolvimento desse estudo foram considerados significativos todos os impactos potenciais moderados ou críticos, ou seja, todos aqueles com pontuações entre 4 e 12.

As Tabelas 3 e 4 demonstram a avaliação de aspectos e impactos potenciais para o forno rotativo a óleo, e elétrico a indução, respectivamente.



**Tabela 3:** Aspectos e impactos ambientais da fusão de ferro fundido em forno rotativo a óleo

Processo de Fundição em Forno Rotativo a Óleo							
PROCESSO	ASPECTO	IMPACTO POTENCIAL	Abran.	Sev.	Freq.	Imp.	Sig.
Estocagem Óleo BTE	Geração de Efluentes Líquidos (vazamentos/armazenamento inadequado)	Contaminação do Solo / Água	3	2	4	9	Sim
Manuseio/Abastecimento Óleo BTE	Geração de Efluentes Líquidos (vazamentos/armazenamento inadequado)	Contaminação do Solo / Água	3	2	2	7	Sim
	Consumo de Energia Elétrica (bombeamento)	Uso de Recursos Naturais	4	2	4	6	Sim
	Consumo de Luvas (EPI's)	Contaminação do Solo/Água e Ocupação em Aterro	1	2	1	4	Sim
Estocagem Oxigênio	Consumo de Energia Elétrica (iluminação / movimentação dos cilindros)	Uso de Recursos Naturais	4	2	1	7	Sim
Manuseio/Abastecimento Oxigênio	Geração de Ruídos	Incômodo à Comunidade	2	2	3	7	Sim
	Consumo de Energia Elétrica	Uso de Recursos Naturais	4	2	3	9	Sim
Estocagem M.P./Insumos	Geração de Resíduos Sólidos	Contaminação do Solo/Água e Ocupação em Aterro	1	2	2	5	Sim
Manuseio/Abastecimento M.P./Insumos	Geração de Resíduos Sólidos	Contaminação do Solo/Água e Ocupação em Aterro	1	2	2	5	Sim
	Consumo de Energia Elétrica	Uso de Recursos Naturais	4	2	3	9	Sim
Fusão (Cizento e Nodular)	Emissões Atmosféricas	Contaminação do Ar e Contribuição para Efeito Estufa	4	4	4	12	Sim
	Geração de Resíduos Sólidos (Escória)	Contaminação do Solo/Água e Ocupação em Aterro	3	4	4	11	Sim
	Geração de Resíduos Sólidos (Embalagens M.P. e Insumos)	Contaminação do Solo/Água e Ocupação em Aterro	1	2	4	7	Sim
	Consumo de Óleo BTE	Uso de Recursos Naturais	3	4	4	11	Sim
	Consumo de Luvas (EPI's)	Contaminação do Solo/Água e Ocupação em Aterro	1	2	1	4	Sim
	Consumo de M.P. (Metais)	Uso de Recursos Naturais	4	4	4	12	Sim
	Consumo de Água (Resfriamento)	Uso de Recursos Naturais	4	2	4	10	Sim
	Geração de Ruídos	Incômodo à Comunidade	2	3	4	9	Sim
	Consumo de Energia Elétrica	Uso de Recursos Naturais	4	2	4	10	Sim
<b>Total</b>						<b>154</b>	

**Tabela 4:** Aspectos e impactos ambientais da fusão de ferro fundido em forno elétrico a indução

Processo de Fundição em Forno Elétrico a Indução							
PROCESSO	ASPECTO	IMPACTO POTENCIAL	Abran.	Sev.	Freq.	Imp.	Sig.
Estocagem M.P./Insumos	Geração de Resíduos Sólidos	Contaminação do Solo/Água e Ocupação em Aterro	1	2	2	5	Sim
	Geração de Resíduos Sólidos	Contaminação do Solo/Água e Ocupação em Aterro	1	2	2	5	Sim
Manuseio/Abastecimento M.P./Insumos	Consumo de Energia Elétrica	Uso de Recursos Naturais	4	2	3	9	Sim
	Emissões Atmosféricas (vaporizações durante processo de fusão)	Contaminação do Ar e Contribuição para Efeito Estufa	3	1	4	8	Sim
Fusão (Cizento e Nodular)	Geração de Resíduos Sólidos (Escória)	Contaminação do Solo/Água e Ocupação em Aterro	3	2	4	9	Sim
	Geração de Resíduos Sólidos (Embalagens M.P. e Insumos)	Contaminação do Solo/Água e Ocupação em Aterro	1	2	4	7	Sim
	Consumo de Luvas (EPI's)	Contaminação do Solo/Água e Ocupação em Aterro	1	2	1	4	Sim
	Consumo de M.P. (Metais)	Uso de Recursos Naturais	3	2	4	9	Sim
	Consumo de Água (Resfriamento)	Uso de Recursos Naturais	4	4	4	12	Sim
	Geração de Ruídos	Incômodo à Comunidade	2	3	4	9	Sim
	Consumo de Energia Elétrica	Uso de Recursos Naturais	4	4	4	12	Sim
	Resfriamento da Água de Refrigeração	Consumo de Energia Elétrica	Uso de Recursos Naturais	4	2	4	10
Geração de Energia (Emergência)	Consumo de Óleo Diesel	Uso de Recursos Naturais	4	4	1	9	Sim
	Emissões Atmosféricas	Contaminação do Ar e Contribuição para Efeito Estufa	4	4	1	9	Sim
	Geração de Ruídos	Incômodo à Comunidade	2	3	1	6	Sim
<b>Total</b>						<b>123</b>	

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise realizada neste estudo contemplou somente as fases do ciclo de vida da produção de ferro fundido pelos processos de fusão tendo como fronteira a empresa de fundição, considerando os dois tipos de fornos estudados, porém analisando-se a diferença das pontuações das avaliações de impacto pode-se notar que, dentro das especificações do escopo desta ACV, o forno elétrico a indução pode ser considerado mais favorável sob o ponto de vista ambiental.

A substituição do ferro gusa por sucata de aço tem impacto bastante significativo a favor do forno elétrico a indução, pois consome-se uma menor quantidade de matéria-prima primária. Na prática essa substituição de matéria-prima está relacionada a uma diminuição relevante na demanda nacional de minério de ferro, que é um recurso natural não renovável. Deixa-se de extrair minério de ferro, dispensando a utilização do alto forno para obtenção do ferro gusa. Como consequência deixa-se também de utilizar o transporte rodoviário que transportaria toneladas de ferro gusa em caminhões movidos a diesel, que é um combustível derivado de outro recurso natural não renovável, do estado de Minas Gerais até o Rio Grande do Sul.

A quantidade de energia elétrica usada diretamente em um forno elétrico a indução é consideravelmente maior do que a quantidade utilizada no forno rotativo a óleo. Porém se for considerado o montante total de energia elétrica consumida durante o ciclo de vida da produção de ferro fundido pelos processos dos dois fornos, incluindo a energia usada para extração e redução do minério de ferro, existe a chance de o consumo real de energia ao longo do processo ser maior ainda no forno rotativo.

A não utilização de combustível derivado do petróleo, e a consequente redução de emissões atmosféricas, também favorecem o forno elétrico a indução.



Quando se pensa em uma suposição para estimar qual forno seria mais interessante deve-se considerar todo o ciclo de vida da produção do ferro fundido. A menor geração de resíduos sólidos encontrada na produção de ferro fundido pelo forno elétrico a indução, principalmente a geração de escória, que pela comparação dos dados de saída das análises do inventário dos dois tipos de fornos pode ser quantificada como sendo dez vezes inferior àquela encontrada no forno rotativo a óleo, também indica o forno elétrico a indução como sendo o menos agressivo sob o ponto de vista ambiental.

A alta significância do impacto potencial causado pelo consumo de água de refrigeração no forno elétrico a indução, que pela análise de impacto foi considerado um item crítico, na verdade possui um grau de importância consideravelmente mais baixo do que o demonstrado, o que resulta em um impacto ambiental real menor do que o impacto potencial considerado. Isso ocorre porque a água de refrigeração é recirculante, fazendo parte de um circuito fechado de refrigeração, enquanto o impacto potencial considera a água de refrigeração como um escoamento aberto, que realmente causaria grande consumo de água. Essa diferença de consumo causada pela recirculação da água reduz a pontuação do consumo de água de refrigeração no quesito de frequência, uma vez que a perda de volume de água em um sistema fechado de refrigeração é de cerca de 5% devido à evaporação e ao arraste da água,<sup>(7)</sup> tornando mais favorável o uso do forno elétrico a indução.

Considerando-se mais uma vez o objetivo e o escopo estipulados para essa ACV, que é a análise ambiental considerando-se a fronteira nos limites da empresa, pode-se afirmar que a escolha da unidade funcional foi prudente. Quantificar os dados de entradas e saídas dos inventários em relação a uma tonelada de ferro fundido produzido permitiu a correta visualização e compreensão das grandezas envolvidas, bem como dos aspectos ambientais e seus respectivos impactos potenciais.

Pela análise dos resultados desta ACV, e levando-se em consideração o potencial de sucesso do forno elétrico a indução em uma ACV completa da produção de ferro fundido pelos dois processos, é recomendado que a empresa opere com o forno elétrico a indução, resultando na diminuição do impacto ambiental associado a atividade de fundição.

## 5 CONCLUSÃO

Foi demonstrado que o forno elétrico a indução, aplicado na fusão de cargas metálicas para obtenção de ferro fundido líquido a ser utilizado na fabricação de peças pelo processo de fundição, é uma alternativa ambientalmente menos agressiva do que o forno rotativo a óleo. A avaliação de impacto baseada nas entradas e saídas da análise dos inventários dos dois tipos de fornos evidencia que os ganhos ambientais, pela diminuição no uso de recursos naturais e a queda nos níveis de geração de resíduos sólidos e emissões atmosféricas, são fatores muito positivos no uso de fornos elétricos a indução.

Foi possível determinar estequiometricamente as emissões do forno rotativo a óleo, onde foi possível perceber a grande quantidade de CO<sub>2</sub> proveniente da reação de combustão do óleo BTE.

Apesar da fronteira para a realização desse estudo de ACV ter sido definida de forma a englobar apenas as operações que acontecem dentro da empresa de fundição onde estão localizados os fornos, foi possível prever que o forno elétrico a indução teria grandes chances de repetir os bons resultados obtidos em seu favor na



ocasião de um novo estudo de ACV, compreendendo todo o ciclo de vida da obtenção de ferro fundido em fornos de fusão.

A ACV demonstrou-se uma ferramenta gerencial de grande valia na tomada de decisões estratégicas relacionadas a questões ambientais, tendo papel primordial na compreensão dos impactos potenciais relacionados a um produto ou processo, sendo uma metodologia de grande relevância na transição para novos paradigmas ambientais.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem a empresa Metalúrgica Lorscheitter Ltda pela disponibilização de dados operacionais, assim como pelo apoio financeiro em conjunto com o CNPq ao projeto de pesquisa e pesquisadores envolvidos.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 SIEGEL, Miguel et al. Fundição. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1982, 749p.
- 2 SOUZA, Walmir. Fornos a indução (Instalações). Joinville: Escola Técnica Tupy 1985, 86p.
- 3 CHEHEBE, José Ribamar B. Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1998. 104p.
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura: NBR ISO 14040:2001. Rio de Janeiro: ABNT, 2001, 10p.
- 5 SGA UNISINOS; GOMES, Luciana P. (Coord.). PO1 - Procedimento de Identificação e Avaliação de Aspectos e Impactos Ambientais e Estabelecimento de Objetivos e Metas e Programa de Gestão Ambiental. Revisão 07 em 18/04/2008. Disponível em: <[www.minha.unisinos.br/sga](http://www.minha.unisinos.br/sga)>. Acesso em: 21 mai. 2008.
- 6 GARCIA, Roberto. Combustíveis e combustão industrial. Rio de Janeiro: Interciência, 2002, 202p.
- 7 BURGER, ROBERT. Cooling Tower Technology: maintenance, upgrading and rebuilding. Lilburn: The Fairmount, 1995, 281p.