

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – ACV DA PRODUÇÃO DE LIGAS DE  
(Nd,Pr)-Fe-B A PARTIR DE UM MINÉRIO BRASILEIRO**

**LIFE CYCLE ASSESSMENT - LCA OF THE PRODUCTION OF (ND,PR)-FE-B  
ALLOYS FROM A BRAZILIAN ORE**

**Michel Serra Sampaio**

Aluno de Graduação de Engenharia Química  
12º período, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ  
Período PIBIC/CETEM: janeiro de 2016 a junho de 2019  
michelserra@eq.ufrj.br

**Francisco Mariano da Rocha de S. Lima**

Orientador, Engenharia Mineral, D. Sc  
flima@cetem.gov.br

**Giancarlo Alfonso Lovón-Canchumani**

Co-orientador, Planejamento Energético, D. Sc  
gcanchumani@cetem.gov.br

**José Luis Saravia Ocharán**

Co-orientador, Engenharia Ambiental, M. Sc  
jsaraviao@poli.ufrj.br

**RESUMO**

A produção das ligas metálicas de (Nd,Pr)FeB requer o uso de Elementos de Terras Raras (ETRs), uma vez que esses elementos apresentam propriedades únicas e essenciais para o desenvolvimento de diversas tecnologias, como a produção de ímãs permanentes utilizados em turbinas eólicas. No entanto, a produção dessas ligas está associada a vários problemas ambientais, pois ela utiliza grandes quantidades de recursos e produz resíduos tóxicos; portanto, estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) são necessários para determinar os potenciais impactos causados por essa produção. O objetivo do presente estudo é realizar a ACV da produção de ligas metálicas de (Nd,Pr)FeB a partir de um minério brasileiro, baseado na norma ISO 14040. A metodologia de pesquisa se baseou em dados coletados no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) em parceria com demais instituições de pesquisa mineral brasileiras, além de dados da literatura. Os resultados da ACV mostraram que a parte mais impactante em todo o processo de produção da liga é a obtenção dos óxidos de terras raras, pois essa fase consome grandes quantidades de insumos e produz enormes volumes de resíduos, incluindo substâncias radioativas como o tório e o urânio. A produção da liga em si teve impacto significativo na categoria de Formação de Oxidante Fotoquímico, pois há emissão de material particulado metálico nesta fase. Os resultados da ACV são relevantes porque não há dados deste tipo disponíveis para o caso brasileiro, servindo de subsídio para uma posterior avaliação da produção de ímãs permanentes a partir da liga.

**Palavras-chave:** avaliação do ciclo de vida; ligas metálicas; minério brasileiro.

## ABSTRACT

The production of (Nd,Pr)FeB metal alloys requires the use of Rare Earth Elements (REEs), since these elements have unique and essential properties for the development of several technologies, such as the production of permanent magnets used in wind turbines. However, the production of alloys is associated with several environmental problems, as it uses large quantities of resources and produces toxic waste; therefore, Life Cycle Assessment (LCA) studies are needed to determine the potential impacts caused by such production. The objective of the present study is to perform the LCA of (Nd,Pr)FeB metal alloys production from a Brazilian ore based on ISO 14040. The research methodology was based on data collected at the Mineral Technology Center (CETEM) in partnership with other Brazilian mineral research institutions, in addition to literature data. The LCA results showed that the most striking part of the whole alloy production process is the production of rare earth oxides, since this phase consumes large quantities of inputs and produces huge volumes of waste, including radioactive substances such as thorium and uranium. The production of the alloy itself had a significant impact in the category of Photochemical Oxidant Formation, since there is emission of metallic particulate material in this phase. The results of the LCA are relevant because there are no data of this type available for the Brazilian case and they serve as a subsidy for a subsequent evaluation of the production of permanent magnets from the alloy.

**Keywords:** life cycle assessment; metallic alloys; Brazilian ore.

## 1. INTRODUÇÃO

Os ímãs permanentes contendo Neodímio (Nd), Praseodímio (Pr), Ferro (Fe) e Boro (B), simbolizados como (Nd, Pr)FeB, são compostos por cerca de 31-32% em peso de ETRs, principalmente Nd e Pr. Esses elementos possuem propriedades físicas específicas que os tornam ideais para sua inclusão em ligas de ímãs permanentes, que por sua vez são utilizados em diversas tecnologias e apresentam um crescimento mundial na sua demanda (ZAKOTNIKA et al., 2016).

No entanto, os ETRs são matérias-primas críticas com alto risco de suprimento. Este risco não está relacionado apenas à sua baixa disponibilidade geológica e à instabilidade geopolítica dos países fornecedores, mas também à sua limitada substituíbilidade e ao baixo potencial de reciclagem. Mais de 90% dos ETRs globais são produzidos na China, mas o Brasil também possui reservas exploráveis desses elementos, o que insere o país em um mercado de enorme potencial econômico e o obriga a desenvolver pesquisas e tecnologias de beneficiamento para as subsequentes produções das ligas metálicas e dos ímãs permanentes (ADIBI et al., 2019).

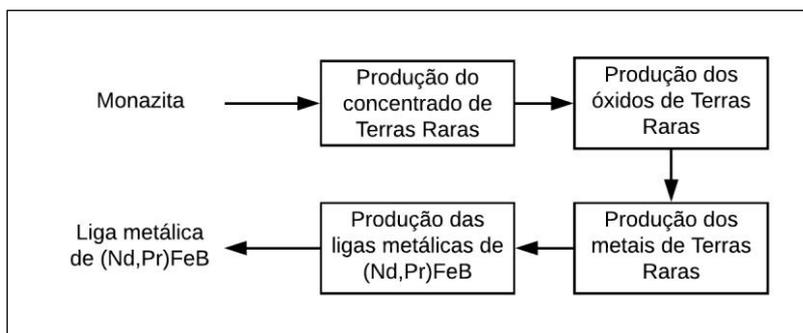
A avaliação da produção de ligas metálicas se faz importante para analisar a carga ambiental, tipos de impacto em cada estágio de produção e identificar os principais processos causadores desses impactos, fornecendo dados básicos para a ACV da produção de ímãs permanentes a partir de um minério brasileiro. Apesar da sua importância fundamental em várias indústrias, até o momento houve poucas pesquisas sobre o inventário do ciclo de vida e avaliação dos impactos ambientais da produção e aplicações de ETRs, em especial para a produção de ímãs permanentes (WANG et al., 2019). Com isso, é de extrema importância a realização de uma ACV da produção de ligas metálicas de (Nd,Pr)FeB que permitam gerar dados e informações para posteriores avaliações na produção dos ímãs permanentes dentro do contexto brasileiro.

## 2. OBJETIVO

O objetivo do presente estudo é realizar a ACV da produção de ligas metálicas de (Nd,Pr)FeB a partir de um minério brasileiro, a fim de determinar os maiores impactos ambientais do processo.

### 3. METODOLOGIA

De acordo com a metodologia da ACV com base na norma ISO 14040 (ABNT, 2009), a unidade funcional definida foi a produção de 1 quilo de liga metálica de (Nd,Pr)FeB. Com o uso de dados coletados no Centro de Tecnologia Mineral - CETEM (SHAW, 1953; DA CUNHA & WILDHAGEM, 2016), juntamente do relatório técnico fornecido pela Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG, 2016) e com informações da literatura, dividiu-se a produção em quatro fases, conforme a Figura 1. Primeiramente, ocorre a produção do concentrado de ETRs a partir da monazita obtida como resíduo do beneficiamento do nióbio realizado em Araxá/Minas Gerais, não sendo considerada portanto a extração da monazita da mina. Na segunda fase, o concentrado sofre um processo de lixiviação para se obter os óxidos de ETRs. Esses óxidos são posteriormente reduzidos a metais por meio de um processo de eletrólise e tem-se finalmente a produção das ligas a partir da fundição dos metais de ETRs com Fe e B, obtendo-se a liga metálica de (Nd,Pr)FeB.



**Figura 1:** Diagrama das fases da produção das ligas metálicas de (Nd,Pr)FeB.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O inventário do ciclo de vida (ICV) para a produção de 1 quilo de liga de (Nd,Pr)FeB a partir de ETRs é mostrado na Tabela 1.

**Tabela 1:** ICV da produção de 1 quilo de liga de (Nd,Pr)FeB a partir de ETRs.

Fase 1: Produção do concentrado de ETRs			
Entradas		Saídas	
Monazita	9,84 kg	Tório	393,60 g
Ácido Sulfúrico H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 93%	15,36 kg	Urânio	14,76 g
Amônia NH <sub>3</sub> 28%	1,986 kg	Sílica	295,20 g
Água	167,28 L		
Fase 2: Produção dos óxidos de ETRs			
Entradas		Saídas	
Concentrado de ETRs	30,84 L	Óxido de Lantânio	1 kg
Ácido Clorídrico HCl 37%	322,92 L	Óxido de Cério	1 kg
Hidróxido de Amônio NH <sub>4</sub> OH 25%	298,98 L	Óxido da Fração Média	1 kg
		Óxido da Fração Pesada	1 kg

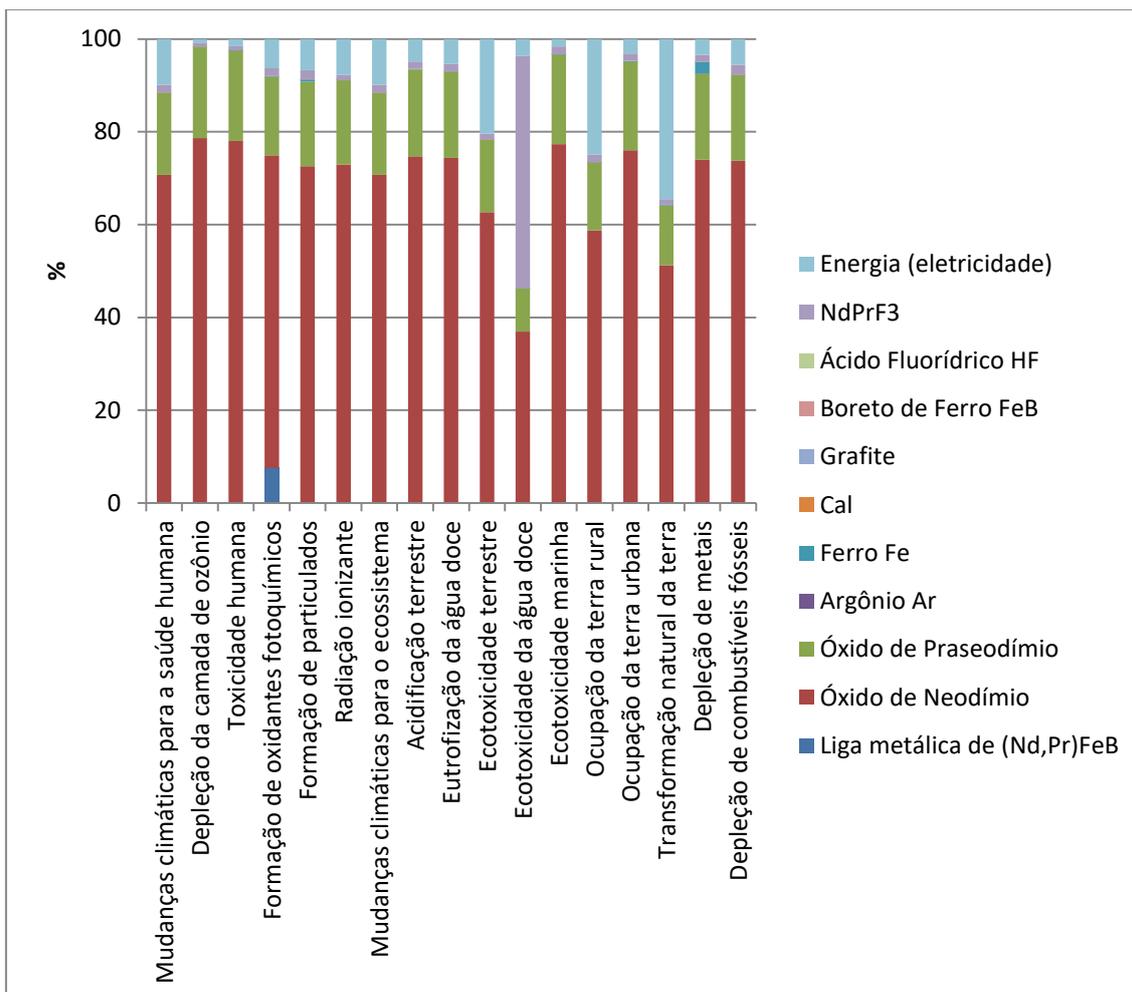
**Tabela 1 (cont.):** ICV da produção de 1 quilo de liga de (Nd,Pr)FeB a partir de ETRs.

Fase 3: Produção dos metais de ETRs			
Entradas		Saídas	
Óxidos de Neodímio (80%) e Praseodímio (20%)	1,249 kg	Monóxido/Dióxido de Carbono CO/CO <sub>2</sub>	1,2375 kg
NdPrF <sub>3</sub>	0,1 kg	Ácido Fluorídrico HF	7,87 g
Ácido Fluorídrico HF	0,01 kg	Fluoreto de Cálcio CaF <sub>2</sub>	50,0 g
Grafite	0,3 kg	Sulfato de Cálcio CaSO <sub>4</sub>	6,75 g
Cal	44,45 g	(Nd,Pr)O fino	55,63 g

Fase 4: Produção das ligas metálicas de (Nd,Pr)FeB			
Entradas		Saídas	
(Nd, Pr) metálico (30%)	0,3 kg	Argônio Ar	0,1 kg
Argônio Ar	0,1 kg	(Nd,Pr) metálico - emissão	0,5 g
Ferro Fe (69%)	0,69 kg	(Nd,Pr)FeB	1,0 kg
Boreto de Ferro FeB (1%)	0,01 kg		

Utilizando os dados do inventário, foi possível realizar a ACV da produção dessas ligas com o uso do software SimaPro 8.02, cujos resultados são mostrados na Figura 2.



**Figura 2:** Resultado da ACV para a produção de 1 quilo de liga de (Nd,Pr)FeB.

Ao analisarmos a Figura 2, podemos notar que os óxidos de Nd e Pr são os que mais impactam em todas as categorias analisadas. Isto ocorre porque a produção desses óxidos consome grandes quantidades de recursos e energia, já que essa produção envolve a abertura do minério, seu beneficiamento e a extração dos óxidos de interesse. Além disso, nessas etapas também ocorre a produção de elementos radioativos, que contribuem para o aumento dos impactos dos óxidos. Por sua vez, a produção da liga metálica de fato mostrou ter impacto relevante na categoria de Formação de Oxidantes Fotoquímicos, devido ao uso de metais como Fe, Nd e Pr e às emissões de particulados tanto dos óxidos de ETRs como das suas formas metálicas. Destaca-se ainda a contribuição do NdPrF<sub>3</sub> para a categoria de Ecotoxicidade de Água Doce, uma vez que o processo de produção deste insumo gera grandes quantidades de água residual.

## 5. CONCLUSÕES

O presente estudo realizou a ACV da produção de 1 quilo de liga metálica de (Nd,Pr)FeB a partir de um minério brasileiro. Os resultados mostraram que a produção dos óxidos de ETRs é o que mais impacta em todas as categorias analisadas. Isso acontece devido ao uso intensivo de insumos e energia, significativamente maiores do que nas demais fases. A produção da liga em si contribui de maneira relevante para a Formação de Oxidantes Fotoquímicos, causada pelas emissões particuladas de metais. A ACV da produção de ligas de (Nd,Pr)FeB mostrou ser de grande importância para contribuir com a base de dados brasileira no que tange aos impactos relacionados à extração de ETRs e à produção de ligas de Nd e Pr, principalmente diante das potenciais aplicações tecnológicas para o cenário do país, como no caso dos ímãs permanentes.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq, pela bolsa concedida e pelo apoio à pesquisa; aos meus orientadores e co-orientadores, que me ajudaram a desenvolver o presente trabalho; aos meus amigos e familiares, que me deram suporte e motivação durante o projeto; e a Deus, por ter permitido que o trabalho fosse concluído com sucesso.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estruturas. NBR ISO 14040, 2009.
- ADIBI, N.; LAFHAJ, Z.; PAYET, J. New resource assessment characterization factors for rare earth elements: applied in NdFeB permanent magnet case study. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 2019, 24: 712-724.
- CODEMIG - Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. Viabilização de um laboratório-fábrica de ímãs de terras raras no Brasil. **Relatório Técnico**, 241p, 2016.
- DA CUNHA, J.W.S.D.; WILDHAGEN, G.R. da S. Elaboração de modelo de produção de elementos e óxidos de terras raras. **CW Consultoria Química e Ambiental LTDA – Relatório técnico**, 21p, 2016.
- SHAW, K.G. A process for separating thorium compounds from monazite sands. **Retrospective Theses and Dissertations**, paper 12740, 1953.
- WANG, L.; JIAO, G.H.; LU, H.S.; WANG, Q.Q. Comparative Life Cycle Assessment of the Production of NdFeB Rare Earth Permanent Magnets based on different Rare Earth Deposits. **Applied Ecology and Environmental Research**, 2019, 17(2):4343-4359.
- ZAKOTNIKA, M.; TUDOR, C.O.; PEIRÓ, L.T.; AFIUNY, P.; SKOMSKI, R.; HATCH, G.P. Analysis of energy usage in Nd-Fe-B magnet to magnet recycling. **Environmental Technology & Innovation**, 2016, 5: 117-126.