

Avaliação comparativa do ciclo de vida de materiais usados em blocos de motor

José Tomadon Junior (UTFPR – CP) jtjunior@utfpr.edu.br
Raphael Tavares Callado (UTFPR-CP) raphaelcallado@hotmail.com

Resumo:

Com mercados cada vez mais exigentes em relação à performance e sustentabilidade, as empresas buscam alternativas para manter a competitividade de seus produtos, portanto a análise de materiais e processos é indispensável para obter seus objetivos. Este trabalho questiona, a partir desta premissa, o desenvolvimento sustentável da indústria automobilística brasileira, especificamente no campo dos motores de combustão interna, propondo a utilização da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta comparativa de impactos ambientais. Dentro desta análise, dados de dois blocos de motores, constituídos respectivamente de ferro fundido e alumínio, foram confrontados. As informações foram analisadas de forma a caracterizar o ciclo de vida do produto, desde a extração de matéria-prima até seu descarte. A metodologia do estudo ACV baseou-se em diretrizes de órgãos de padronização, como a ISO 14040. Observou-se nos resultados que o bloco de alumínio obteve impactos nitidamente menores quando comparado com o bloco de ferro fundido, devido ao modo de extração de matérias-primas e o processo de fabricação do metal. Quanto às categorias de impacto, o indicador *ecotoxicidade marinha* representou as maiores emissões do bloco de ferro fundido e de todo o estudo. Outros indicadores discrepantes foram *ecotoxicidade de água-doce* e *toxicidade humana*, todas favorecendo o alumínio. Concluiu-se que o bloco de motor de alumínio em questão tem grandes vantagens ambientais e possivelmente econômicas quando comparado com o motor de ferro fundido. O resultado do presente trabalho ilustrou o potencial do alumínio como material automotivo, trazendo benefícios para a indústria aplicando o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida, Comparação de motores, Análise de materiais, Sustentabilidade.

Comparative life cycle assessment of materials used in engine blocks

Abstract:

With markets more demanding about performance and sustainability, companies look for alternatives to keep their product's competitiveness, hence analysis of materials and processes is essential to their objective's achievements. This paper questions, from these premises, the sustainable development in the Brazilian automotive industry, particularly in the internal combustion engines field, proposing the use of the Life Cycle Assessment as a comparative tool for environmental impacts. Inside this analysis, data from two cylinder blocks, made respectively of cast iron and aluminum, were compared. Among the possible phases of study, the phase of extraction and production of raw materials needed for the block's production was selected. LCA methodology is based on policies from padronization agencies, like ISO 14040. The observed results have shown the aluminum block had minor impacts when compared to the cast iron block, due to the extraction type of raw materials and metal making. Regarding the impact categories, the indicator *marine ecotoxicity* stood for the highest emissions to both of the blocks. Other discrepant indicators were *freshwater ecotoxicity* and *human toxicity*, all favoring aluminum. It was concluded that the aluminum engine block has great ambient advantages and possibly economical ones when compared to the cast iron engine block. The result of this paper

illustrated the potential of aluminum as automotive material, bringing benefits to industry and applying sustainable development.

Keywords: Life cycle assessment. Engine comparison. Materials analysis. Sustainability.

1. Introdução

A redução de emissões no meio ambiente tornou-se um objetivo constante na agenda mundial. Metas de redução são firmadas regularmente em conferências mundiais por vários países, num esforço mútuo em direção à preservação ambiental. Com isso, as empresas tiveram que se adaptar às novas metas, introduzindo essa esfera ambiental às tomadas de decisões (FUNDAÇÃO DOM CABRAL, 2003).

A indústria automotiva, como todos os outros ramos, viu-se obrigada a investir em tecnologias para adequar-se às regulamentações e assim reduzir o impacto de seus produtos ao meio ambiente. Para atingir esta meta, uma das alternativas é a diminuição do peso do veículo, mais especificamente o peso do motor, que deve contribuir para uma melhor economia de combustível e redução de emissões. Analisando os componentes do motor, o bloco do motor tem uma massa considerável, por ser constituído de ferro fundido, material que é usado na maioria da frota brasileira, portanto é razoável escolhê-lo como objeto de estudo (CASSIANO, 2014).

O aumento da conscientização com a proteção do meio ambiente, e os possíveis impactos associados com produtos, criaram um maior interesse em desenvolver métodos que pudessem avaliar e melhor entender estes impactos. Uma das ferramentas criadas foi a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (ABNT, 2001).

Seguindo este caminho de diminuição de peso de componentes automotivos, Alcoa (2012) comparou, através de ACVs, os impactos causados pela produção e uso de conjuntos de rodas de caminhão distintos: um de alumínio forjado, de fabricação própria, e a outra, de aço. Seus resultados mostraram que, apesar da roda de aço emitir 3,8 toneladas de CO₂-equivalente a menos do que a de alumínio, em uma análise parcial *cradle-to-gate* ("do berço ao portão"), as rodas de alumínio reverteram o resultado na análise completa, notadamente nas fases de uso e descarte, totalizando uma redução de 15,3 toneladas de CO_{2eq}, quando comparado com as rodas de aço. O desempenho em outras categorias mostrou-se semelhante, demonstrando a superioridade ambiental do alumínio em relação ao aço. A superioridade do alumínio também foi presente no trabalho de Teksid (2006), que realizou a comparação de blocos de motor de ferro fundido com blocos de alumínio. Os indicadores mostraram uma carga de 41,3 pontos para o bloco de ferro fundido, e 28,9 pontos para o bloco de alumínio. Evidenciou-se a larga participação da categoria de impacto "Combustíveis Fósseis" em ambos os materiais e na maioria das fases analisadas, e a diminuição de cargas ambientais de acordo com o aumento da participação do alumínio secundário na fase de produção.

Diante da situação ambiental mundial e da indústria nacional, do conhecimento dos resultados mostrados na literatura e pela facilidade que a avaliação do ciclo de vida aparenta proporcionar como método, este trabalho realizou uma análise comparativa de produção de materiais usados na fabricação de blocos de motor, utilizando a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida, tendo como objetivo identificar o material de menor carga ambiental, através da quantificação do potencial impacto ambiental causado pelo processo de produção do alumínio e do ferro fundido.

Além dos ganhos individuais possíveis, espera-se que o conhecimento adquirido influencie a indústria automotiva nacional, de modo que a transição para motores mais eficientes seja mais rápida, estimulando a criação de novas tecnologias no ramo, ideais que certamente fortaleceriam a indústria brasileira.

2. Materiais e Métodos

Nesta seção, serão apresentados brevemente informações sobre os materiais utilizados, e em seguida serão descritos a metodologia da ACV, bem como sua aplicação neste trabalho.

2.1 Ferro fundido

Os ferros fundidos são ligas ferrosas que, juntamente com os aços, são amplamente utilizadas e produzidas, mais do que qualquer outro tipo de metal. Isso se deve a alguns fatores, tais quais: os compostos de ferro são encontrados em farta quantidade em nosso planeta; seus processos de extração, refinamento e produção são acessíveis economicamente; possuem uma grande variedade de usos, devido às suas propriedades (CALLISTER, 2008).

Uma definição mais técnica é feita por Chiaverini (2008), que define o ferro fundido como "a liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima e 2,0%, em quantidade superior à que ser retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita".

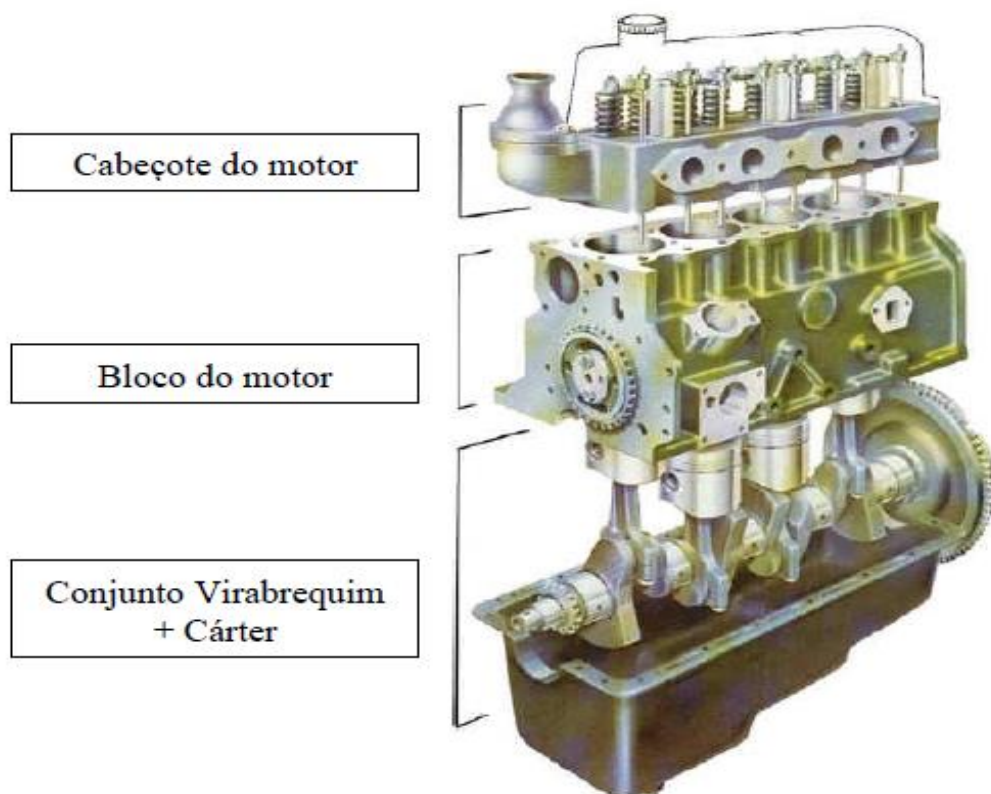
2.2 Alumínio

O alumínio é um metal não-ferroso de crescente popularidade, devido às suas atraentes características físico-químicas, como o baixo peso específico, resistência à corrosão, alta condutibilidade elétrica e térmica, e praticamente infinita taxa de reciclagem. Estes atributos, somados à sua facilidade de uso em processos industriais, permitem sua aplicação em diversas áreas da engenharia (ABAL, 2012).

2.3 Bloco de motor

Para Boff (2003), o bloco é considerado o elemento mais importante do motor, pois os componentes protegidos são fundamentais para o funcionamento do mesmo. É nos cilindros que ocorre as fases de compressão e explosão do combustível misturado com oxigênio. Tal processo promove o deslocamento dos pistões, transformando energia térmica em energia mecânica, que será manejado pelas bielas e pelo virabrequim.

Dentro da composição do motor, os blocos estão localizados entre o cárter e o cabeçote, revestindo partes do motor, como mostra a Figura 1. Na parte superior, o bloco atua como suporte para o cabeçote, que tem como função controlar a alimentação do motor através de seu conjunto de válvulas. Na parte inferior, o bloco também atua como suporte, mas do cárter, componente que atua como reservatório de óleo. Ao longo do bloco, pode-se observar diversas outras funções: a alocação de vários componentes do motor, como o conjunto pistão-biela-virabrequim, coletores de admissão e escape, motor de arranque, válvulas, sensores e elementos de transmissão; a garantia de estanqueidade ideal para as juntas e anéis de pistão; o transporte de fluidos para arrefecimento e lubrificação, como água e óleo; e o suporte das cargas inerentes ao funcionamento do motor, como as cargas dos parafusos acoplados (SANTOS, 2013).



Fonte: MARTINS (2012)
Figura 1 - Principais elementos de um motor

2.4 Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida pode ser definida como a avaliação de entradas e saídas de um processo de produção de um produto, avaliação esta que irá quantificar os dados em questão de maneira padronizada, ao mesmo tempo que há também um tratamento qualitativo dos mesmos (SAIC, 2006).

Para Ferreira (2004), "A metodologia ACV é a única que permite identificar a transferência de impactos ambientais de um meio para outro [...] e/ou de um estágio de ciclo de vida para outro." Portanto, um produto usar uma quantidade menor de matérias-primas do que outro não significa que ele vai desenvolver um menor impacto ambiental. Sem um estudo ACV, estas informações não serão visíveis. Segundo SAIC(2006), os métodos mais tradicionais não consideram alguns impactos que são abordados em um estudo ACV, como os de extração de matérias-primas, transporte e descarte. Assim, o estudo ACV revela-se de grande importância para uma real análise de processos/produtos.

A metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida é padronizada pelas normas ISO 14040-44, e no Brasil, tem sua respectiva equivalência feita pela ABNT (ABNT, 2001).

2.4.1 Definição do escopo e dos objetivos

O objetivo principal deste estudo é calcular e comparar o impacto ambiental causado pela obtenção de matéria-prima para produção de dois blocos de motores: um feito em ferro fundido, e o outro, em alumínio.

O escopo do trabalho ficou limitado à extração e produção de matéria-prima pela falta de dados correspondentes às fases de uso e descarte dos blocos. Também foi decidido pelo descarte da fase de transporte, pois o estudo considerou que a produção fosse feita à nível

nacional, não sendo interessante, portanto, o uso dos dados globais que estavam à disposição do trabalho. Para todos os efeitos, a distância de transporte será considerada a mesma para ambos os blocos, e assim, desconsiderada.

Acerca das composições das ligas metálicas constituintes do bloco, será avaliado apenas o material proeminente da liga para o estudo, que corresponde praticamente à totalidade na liga, ou seja, alumínio e ferro fundido, respectivamente. Elimina-se assim a necessidade de escolha de ligas, e são consideradas as mais otimizadas para as necessidades do bloco.

Os blocos diferem-se principalmente pelo material utilizado e pela arquitetura, mas como desempenham a mesma função, a unidade funcional é a " capacidade de fazer um motor de combustão interna funcionar por 200.000 quilômetros".

A Figura 2 mostra, de forma simplificada, os limites dos sistemas estudados:

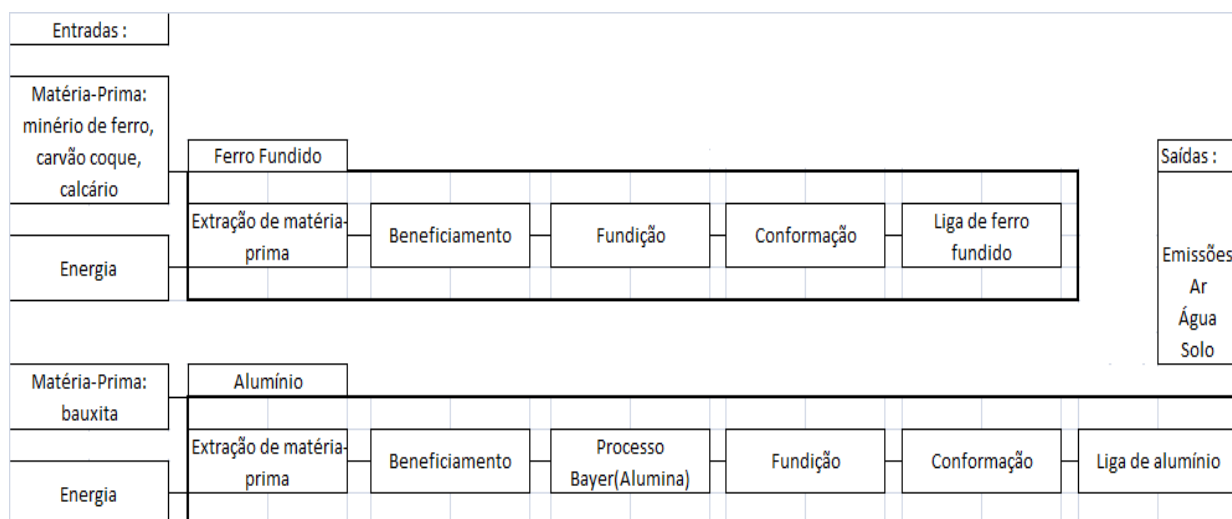


Figura 2: Limites dos sistemas de extração e produção dos materiais dos blocos

2.4.2 Inventário do ciclo de vida

Definidas as metas e escopo do estudo, é realizado a etapa de análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), que é o processo baseado em dados que identifica e quantifica as entradas e saídas do ciclo de vida do produto (EPA, 1993).

Os inventários do ciclo de vida foram calculados predominantemente por dados secundários, obtidos através da base de dados *EcoInvent 3*, e foram tratados e compilados no *software* SimaPro 8. Os dados relativos ao peso dos blocos foram alcançados por pesquisas em campo. Será utilizado um bloco de motor de ferro fundido pesquisado por Vasconcellos (2015), cujo peso (40kg) será utilizado como base para o inventário do bloco de ferro fundido; o bloco de alumínio teve seu peso (13,3kg) encontrado após pesquisas em campo, por meio de concessionárias de veículos, e pela internet, por meio de sites especializados em automóveis.

Devido a enorme quantidade de dados, o inventário ficou impossibilitado de ser exibido, sendo contabilizado diretamente na caracterização dos impactos ambientais.

2.4.3 Avaliação do impacto do ciclo de vida

Após quantificados, os dados reunidos na análise de inventário são tratados qualitativamente na Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV). Esta fase consiste inicialmente na seleção de categorias de impacto, indicadores de categoria e de modelos de caracterização. Em seguida, os dados de inventário são classificados segundo as categorias de impacto

selecionadas, para então ser calculados os resultados dos indicadores de categoria. Estes passos têm caráter obrigatório na AICV (EPA, 1995).

O método ReCiPe, desenvolvido por Goedkoop et al (2008) foi utilizado para avaliar 18 categorias de impacto, através dos resultados dos indicadores e posterior caracterização. Os resultados podem ser então normalizados, ou seja, por meio de um fator de normalização, é possível expressar os impactos comparados com valores de referência de determinado local. Assim, os resultados alcançam um melhor grau de consistência. Os impactos caracterizados e normalizados, bem como suas principais emissões podem ser vistos na Tabela 1:

	Material/ Categoria de Impacto	Ocupação de terra para agricultu- ra (m ² a)	Mudança climática (kg CO ₂ eq)	Depleção de recursos fósseis (kg oil eq)	Ecotoxicidad e de água- doce (kg 1,4-DB eq)	Eutrofizaç ão de água- doce (kg P eq)	Toxicidade humana (kg 1,4- DB eq)	Radiação ionizante (kBq U235 eq)	Ecotoxicid e marinha (kg 1,4- DB eq)	Eutrofizaç ão marinha (kg N eq)
Caracterização (total)	Alumínio	0	95,367885	22,706845	0,0928296	2,663E-08	2,9408235	0	0,1028219	0,0088539
	Ferro fundido	0,9950986	96,744563	18,862251	1,1720037	0,0270285	48,146701	3,6902921	0,9951529	0,0136805
Normalização (total)	Alumínio	0	0,0100136	0,0176205	0,0216298	9,189E-08	0,0139101	0	0,0489432	0,0012041
	Ferro fundido	0,0001831	0,0101582	0,0146371	0,2730769	0,0932482	0,2277339	0,0085246	0,4736928	0,0018605
	Principais emissões	Ocupação	CO ₂ , NO _x , SO ₂ , CH ₄ , HFC, PFC	Carvão, óleo, gás natural	Cobre, Zinco, Níquel, Bário	Fosfatos	HF, Mercúrio, Bário	Césio-137, Carbono- 14, Rádion- 222	Cobre, Zinco, Níquel, Bário	Cianetos, Amônia, Nitrogênio
	Material/ Categoria de Impacto	Depleção de metais (kg Fe eq)	Transforma- ção de terra natural (m ²)	Depleção de ozônio (kg CFC- 11 eq)	Formação de matéria particulad a (kg PM10 eq)	Formação de oxidante fotoquímico (kg NMVOC)	Acidificaç ão terrestre (kg SO ₂ eq)	Ecotoxicid e terrestre (kg 1,4- DB eq)	Ocupação de terra urbana (m ² a)	Depleção de água(m ³)
Caracterização (total)	Alumínio	0	0	1,15E-07	0,1560573	0,3090807	0,6230116	0,0015819	0	0
	Ferro fundido	35,665711	0,0089699	3,095E-06	0,2812082	0,3810326	0,3431006	0,0156462	0,9526393	106,98339
Normalização (total)	Alumínio	0	0	3,059E-06	0,0110957	0,0054398	0,0174443	0,0002673	0	0
	Ferro fundido	0,0802478	0,0007454	8,232E-05	0,0199939	0,0067062	0,0096068	0,0026442	0,0012289	0
	Principais emissões	Cobre, Crômio, Ferro, Manganês	Transforma- ção de florestas	Hidrocarb onetos	Óxidos de enxofre e nitrogênio, Amônia	Óxidos de enxofre e nitrogênio, Hidrocarb	Óxidos de enxofre e nitrogênio	Zinco, Vanádio, Cobre, Selênio	Ocupação para indústrias, mineração	Água para uso em turbinas

Tabela 1: Caracterização e normalização dos inventários dos blocos de alumínio e ferro fundido

3. Resultados e discussão

Os impactos ambientais comparativos dos blocos de motor selecionados são mostrados adimensionalmente na Figura 2. Embora alguns indicadores obtiveram resultados ínfimos, pode-se visualizar no gráfico que há indicadores de impacto elevados relacionados ao bloco de ferro fundido, notadamente *ecotoxicidade marinha*, *ecotoxicidade de água-doce*, *eutrofização de água-doce*, *depleção de metais* e *toxicidade humana*. Esses resultados mostram-se mais discrepantes quando comparados aos respectivos indicadores do bloco de alumínio, que atingiram valores predominantemente baixos. Até mesmo o indicador mais alto de alumínio, *ecotoxicidade marinha*, aparenta-se reduzido frente ao indicador de ferro fundido correspondente.

O resultado absoluto na fase de extração e produção é correspondente com a literatura, quanto a comparação com outras fases de uma ACV *cradle-to-grave*(do berço ao túmulo). Apesar de representar uma pequena parcela do total, a fase de extração e produção é sem dúvida

essencial, pois o desempenho dos impactos ambientais relacionados às fases restantes é dependente desta fase inicial. Uma redução significativa no peso de um veículo certamente pode traduzir-se em menor quantidade de combustível, que provocará uma diminuição dos impactos ambientais atrelados à fase de uso. De modo similar, materiais altamente recicláveis podem desempenhar papel importante na redução dos impactos relacionados às fases de extração e de descarte. Portanto, os resultados atingidos não devem ser interpretados de maneira clássica, e sim de uma forma mais ampla.

Apesar de ter resultados gerais parecidos com a literatura, é interessante notar o impacto negativo da produção de ferro fundido principalmente em ambientes aquáticos, evidenciando portanto uma relação singular nesta cadeia de produção.

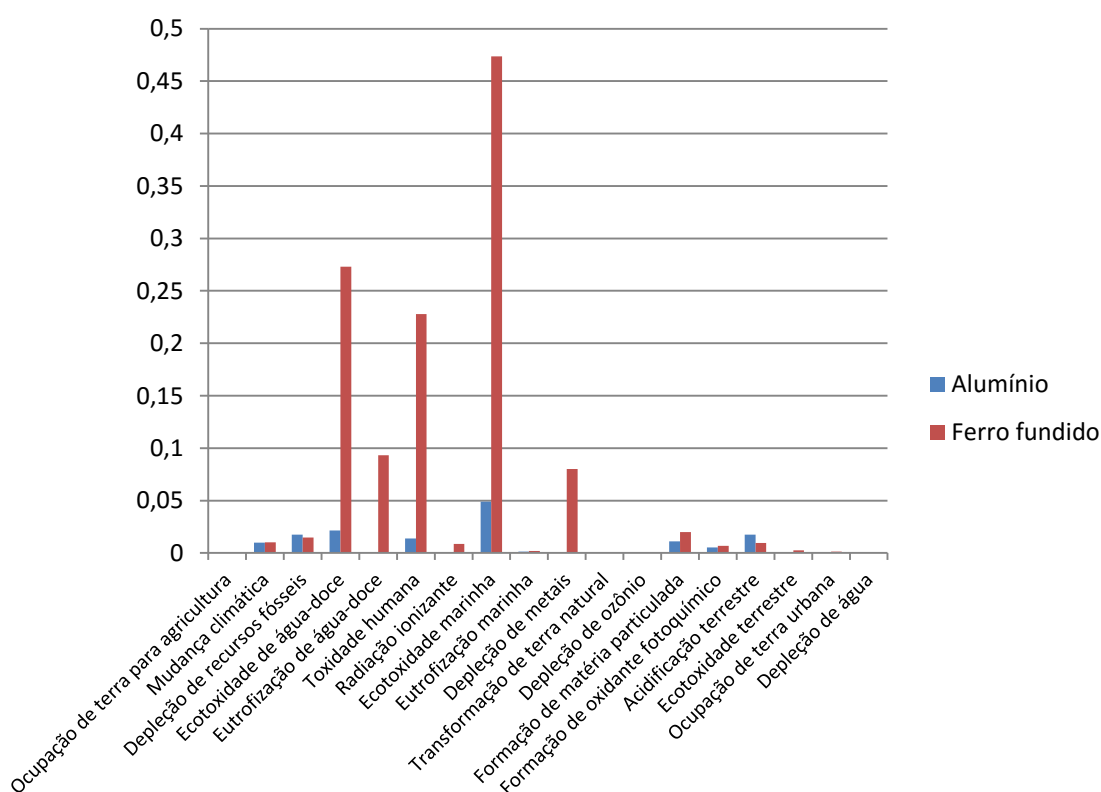


Figura 3 : Resultados absolutos normalizados dos indicadores de impacto

A Figura 4 ilustra os indicadores normalizados de impacto em porcentagens, possibilitando assim a análise mais esclarecida dos indicadores quando comparados entre si, mesmo os de baixa contribuição. Nestes resultados percentuais, nota-se o predomínio do alumínio nos indicadores *acidificação terrestre* e *depleção de recursos fósseis*. Entretanto, é absurdamente menor sua participação se comparada ao ferro fundido.

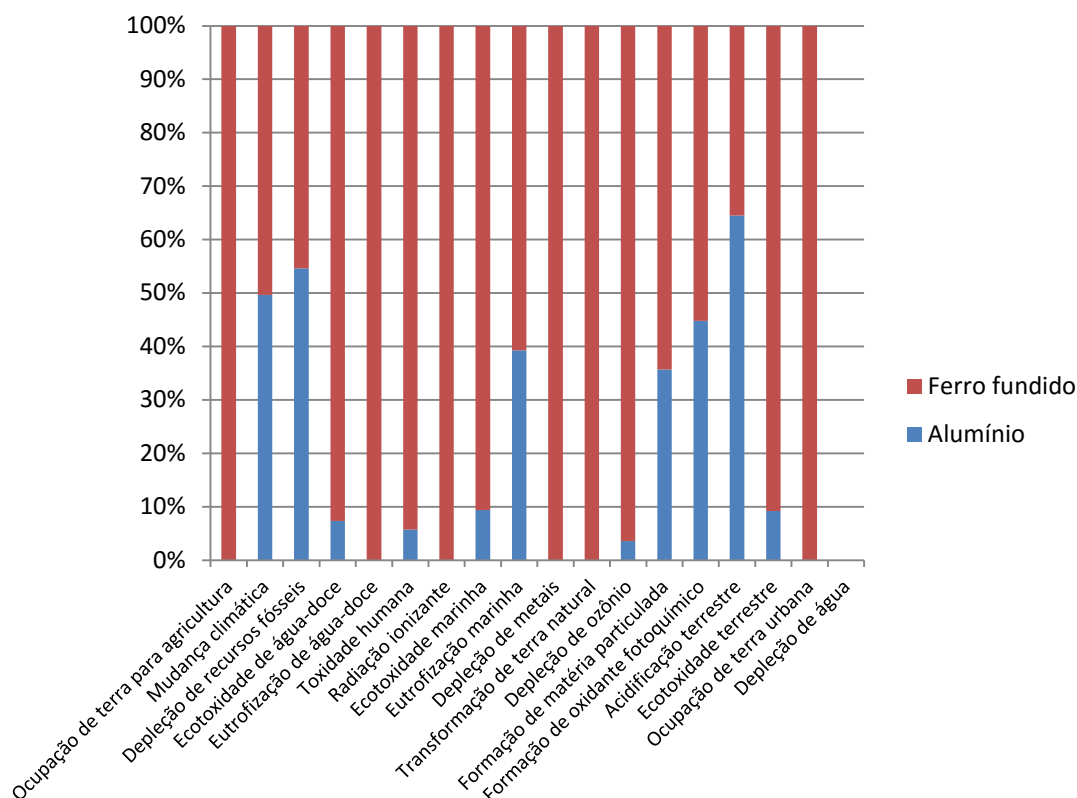


Figura 4: Resultados normalizados dos indicadores de impacto, em porcentagens

4. Conclusão

Por meio do presente trabalho, foi possível avaliar as cargas ambientais relativas à extração e produção dos materiais necessários para a produção de blocos de motor. Os blocos analisados, de alumínio e ferro fundido, foram comparados através da ferramenta de Avaliação do ciclo de vida, que qualificou e quantificou as informações, traduzindo-as em indicadores ambientais a serem interpretados. Avaliados ambos os blocos, fica evidente a grande diferença entre os materiais estudados no quesito ambiental, com ampla vantagem em favor do alumínio. Este resultado, apesar de suas restrições, mostra não só o potencial do alumínio como material, mas também atesta o uso de ferramentas como a avaliação do ciclo de vida como meio para elucidar questões de difícil abordagem e compreensão.

Referências Bibliográficas

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura.* Rio de Janeiro, 2001.
- ALCOA.** *Comparative Life Cycle Assessment of Aluminum and Steel Truck Wheels.* 2012.
- BOFF, Cristiano R.** *Metodologia de análise de blocos de motores. Aplicação a blocos de motores diesel em ferro fundido vermicular.* 2003. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- CALLISTER, William D. Jr.** *Ciência e engenharia dos materiais: Uma introdução.* 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CASSIANO, Carolina.** *Olho no futuro.* *Revista Alumínio*, São Paulo: Cecom, Julho, set. 2014. Disponível em: <<http://www.revistaaluminio.com.br/recicla-inovacao/40/artigo334078-1.asp>>. Acesso em: 15 abr. 2015.

CHIAVERINI, Vicente. *Aços e ferros fundidos*. 7. ed. ABM, São Paulo, 2012.

EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Life cycle assessment: Inventory guidelines and principles*. Washington, DC, 1993.

EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Life cycle impact assessment: A conceptual framework, key issues, and summary of existing methods*. Research Triangle Park, 1995.

FERREIRA, José Vicente Rodrigues. *Análise de ciclo de vida dos produtos*. 2004. Instituto Politécnico de Viseu.

FUNDAÇÃO DOM CABRAL. *Sustentabilidade e poder nas organizações: Temas Emergentes*. 2003. Disponível em: <http://www.fdc.org.br/hotsites/mail/livro_sustentabilidade_poder/temas-emergentes/dimensao-meio-ambiente/metad-reducao-de-CO2-na-cadeia-produtiva.html>. Acesso em: 20 abr. 2015.

GOEDKOOP, Mark et al. *ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*. Holanda, 2008.

SAIC. SCIENTIFIC APPLICATIONS INTERNATIONAL CORPORATION. *Life cycle assessment: principles and practice*. Cincinnati, 2006.

TEKSID ALUMINUM. *Life cycle assessment in the automotive industry: comparison between aluminium and cast iron cylinder blocks*. Metallurgical Science and Technology. Itália, 2006.

VASCONCELLOS, Douglas Pereira. *Avaliação do impacto ambiental causado pela produção de um motor flex*. Cornélio Procopio, PR, 2015.

SANTOS, Dinécio Filho. *Alterações metalúrgicas e topográficas do cilindro de bloco de motor de combustão interna flex-fuel*. 2003. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.