











ARTIGO ORIGINAL

Avaliação do ciclo de vida do alumínio contido em turbocompressores

Análisis del ciclo de vida del aluminio contenido en turbocompressores

Life cycle assessment of the aluminum contained in turbochargers

Jean Guilherme Azarias^{1*}  
Lucas Daniel Del Rosso Calache²  
Érica Gonçalves Rezende²  
Thiago Venancio de Matos²
Aldo Roberto Ometto²  
Aparecido dos Reis Coutinho¹  

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Faculdade de Engenharia e Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Piracicaba, SP, Brasil

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil

* jeangazarias@gmail.com

Resumo

No atual cenário industrial, em que as questões ambientais influenciam no desenvolvimento de produtos, é fundamental que haja um entendimento detalhado dos impactos ambientais associados ao longo do ciclo de vida dos materiais. O alumínio é um dos metais mais importantes da sociedade moderna, possuindo ampla aplicação em diversos setores. Nesse sentido, os impactos ambientais associados ao uso do alumínio possuem relevância global e devem ser analisados em suas diferentes aplicações. No segmento automotivo, o alumínio é mundialmente utilizado por ser um material leve e versátil. Como exemplo disso, os turbocompressores são dispositivos utilizados em motores de combustão interna e possuem parte dos componentes produzidos em alumínio. O presente artigo tem como objetivo analisar, a partir da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), os potenciais impactos ambientais associados aos componentes de alumínio utilizados na fabricação de turbocompressores, identificando as etapas com maior impacto e ações para mitigação dos impactos. O estudo contempla as etapas de definição do objetivo e escopo, inventário do ciclo de vida, análise dos impactos e interpretação dos resultados, conforme previsto na norma ABNT ISO 14040. Para a análise dos impactos, é utilizado o método EDIP 97, por possuir abrangência global e contemplar categorias de impacto relevantes. Os resultados apresentam a etapa de extração e beneficiamento do alumínio como a mais impactante para a maioria das categorias de impacto – aquecimento global, acidificação, eutrofização, toxicidade humana e ecotoxicidade. Dessa forma, estratégias para redução da produção de matéria-prima virgem, bem como o prolongamento da vida útil do produto, poderiam resultar em significativas reduções dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do alumínio utilizado em turbocompressores.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida. ACV. Alumínio. Turbocompressor. Indústria automotiva.

Recebido: 09 maio 2018

Aceito: 30 julho 2019

Publicado: 07 janeiro 2020

Copyright: © 2019 Azarias et al.
Este artigo é publicado em acesso aberto e distribuído sob os termos da [Licença Creative Commons Atribuição](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) (CC BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos, desde que creditados os autores e a fonte original.

Financiamento: O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Editora:



Resumen

En el actual escenario industrial mundial, en que las cuestiones ambientales influyen en el desarrollo de productos, es fundamental que haya un entendimiento detallado del impacto ambiental asociado a todo el ciclo de vida de los materiales. El aluminio es uno de los metales más importantes de la sociedad moderna, con amplia aplicación en diversos sectores. En este sentido, el impacto ambiental asociado al uso del aluminio tiene relevancia global y debe ser analizado en sus diferentes aplicaciones. En el segmento automotriz, el aluminio se utiliza en todo el mundo como un material ligero y versátil. Como ejemplo de ello, los turbocompresores son dispositivos utilizados en motores de combustión interna y tienen parte de los componentes hechos de aluminio. En el presente artículo se pretende analizar, a partir de la técnica de análisis de ciclo de vida (ACV), los potenciales impactos ambientales asociados a los componentes de aluminio utilizados en la fabricación de turbocompresores, identificando las etapas con el mayor impacto y las acciones para mitigar el impacto. El estudio contempla las etapas de definición del objetivo y alcance, inventario del ciclo de vida, análisis del impacto e interpretación de los resultados, conforme previsto en la norma ABNT ISO 14040. Para el análisis de los impactos, se utiliza el método EDIP 97, por poseer cobertura global y contemplar las categorías de impacto pertinentes. Los resultados muestran la etapa de extracción y el proceso de la beneficiación del aluminio como la más impactante para la mayoría de las categorías de impacto - calentamiento global, acidificación, eutrofización, toxicidad humana y ecotoxicidad. De esta forma, estrategias para reducir la producción de materia prima virgen, así como la prolongación de la vida útil del producto, podrían resultar en una reducción significativa del impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida del aluminio utilizado en turbocompresores. Palabras-clave: Análisis del Ciclo de Vida. ACV. Aluminio. Turbocompresor. Industria automotriz.

Abstract

In the current global industrial scenario, where environmental issues influence product development, it is essential to have a detailed understanding of the environmental impacts associated with the materials life cycle. Aluminum is one of the most important metals in modern society, having wide application in several sectors. In this sense, the environmental impacts associated with the use of aluminum have global relevance and should be analyzed in their different applications. In the automotive segment, aluminum is used worldwide as a lightweight and versatile material. As an example of this, turbochargers are devices used in internal combustion engines and have part of the components made of aluminum. The present article aims to analyze, from the Life Cycle Assessment (LCA) technique, the potential environmental impacts associated with the aluminum components used in the manufacture of turbochargers, identifying the stages with the greatest impact and actions to mitigate impacts. The study contemplates the stages of goal and scope definition, life cycle inventory, impact analysis and interpretation of results, as provided by ABNT ISO 14040 standard. For the analysis of impacts, the EDIP 97 method is used, since it covers a global scope and relevant impact categories. The results show the aluminum extraction and processing step as the most impacting for most impact categories - global warming, acidification, eutrophication, human toxicity, and ecotoxicity. Thus, strategies to reduce the production of virgin raw material, as well as the prolongation of the useful life of the product, could result in significant reductions of the environmental impacts throughout the life cycle of the aluminum used in turbochargers.

Keywords: Life Cycle Assessment. LCA. Aluminum. Turbocharger. Automotive industry.

1. INTRODUÇÃO

Avaliar o desempenho ambiental por meio da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) No atual cenário competitivo, a sustentabilidade empresarial consiste de um fator essencial para

que as organizações sejam mais duradouras e lucrativas; de modo que é importante que empresas incorporem os aspectos da sustentabilidade nas suas atividades, como por exemplo a gestão do ciclo de vida (Oliveira, Silva e Oliveira 2018).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é reconhecida como uma das principais ferramentas para análise ambiental, que teve suas origens na indústria de embalagens e ao longo dos anos conquistou espaço em muitos setores, incluindo a indústria de mineração e metalúrgica (Alves, Coutinho 2019; Chen, Wang, Wu, Li, Li, Pan e Zuo 2019). Os estudos de ACV se destacam pela possibilidade de aplicação em sistemas industriais, incluindo-se a análise do desempenho ambiental de produtos (Oliveira, Silva e Oliveira 2018).

Além das contribuições para melhor entendimento dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de produtos, a ACV pode contribuir para a formação de uma cadeia de suprimentos de circuito fechado, possibilitando a reutilização e reciclagem de materiais escassos e não renováveis (Braghirolli, Medeiros, Dias e Sensi Filho 2018). Dentre esses materiais, o alumínio – Al é o segundo metal mais utilizado na sociedade moderna, sendo aplicado em embalagens, construções, indústrias de transformações, metal-mecânica, transporte entre outras (Liu, Müller e 2012).

Segundo Sverdrup, Ragnarsdottir, Koca (2015), a produção primária de Al deve atingir o pico nas próximas décadas, existindo um potencial esgotamento das reservas naturais e consequente aumento do preço do produto. Nesse sentido, estudos vêm sendo desenvolvidos para melhorar a eficiência de sistemas de reciclagem do material (Sevigné-Itoiz, Gasol, Rieradevall e Gabarrell 2014; Niero e Olsen 2016), sendo a ACV uma das principais ferramentas utilizada para essas análises (Liu, Müller 2012).

Considerando a relevância do Al em diversos setores, é pertinente o desenvolvimento de estudos referentes ao ciclo de vida desse material em suas diferentes aplicações. Assim, o presente artigo tem como objetivo fazer uma análise a partir da ACV, para identificar os potenciais impactos ambientais associados aos componentes de Al na fabricação de turbocompressores, as etapas com maior impacto e apresentar possíveis ações para mitigação desses impactos.

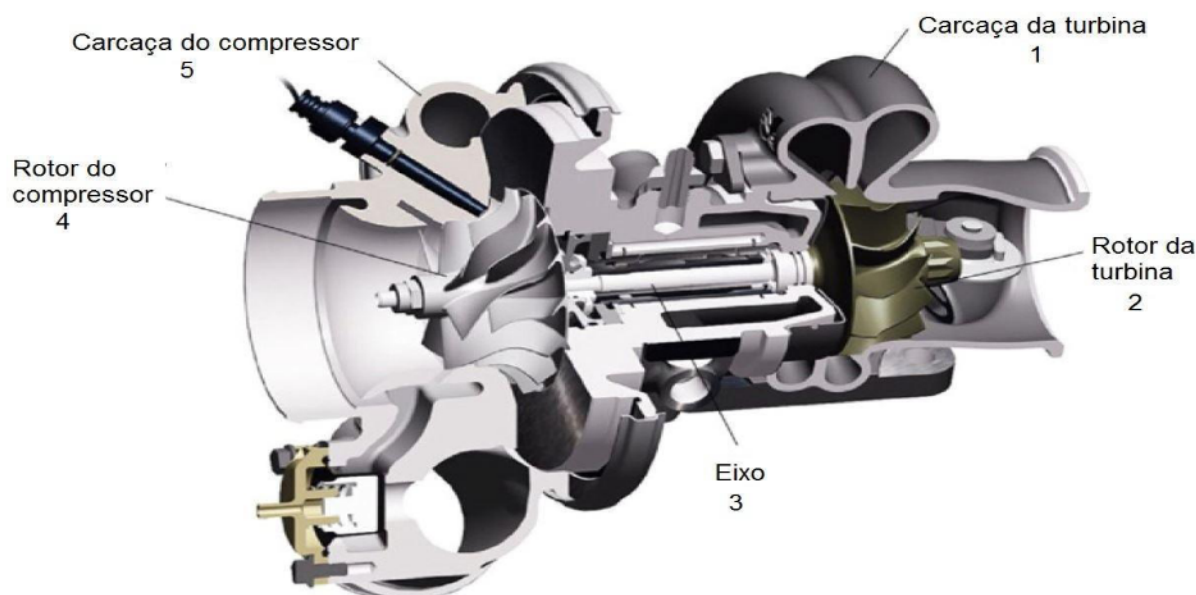
1.1. Turbocompressores

A partir da diminuição na oferta e aumento no custo do petróleo, é constante a busca por maior economia de combustível por parte dos fabricantes de motores automotivos (Katsanos, Hountalas e Zannis 2013). No mesmo sentido, os fabricantes enfrentam continuamente os desafios para cumprir as regulações de emissões de resíduos sólidos e gasosos, cada vez mais rigorosas, assim como atender às exigências do mercado (Sun, Hanna, Hu, Curtis, Yi e Tjong 2014).

Considerando a necessidade de redução do consumo de combustível, o foco das inovações no setor de veículos pesados está voltado para a redução do peso e aumento da potência dos motores. O uso de turbocompressores (TC) em motores de veículos pesados é considerado um dos meios com melhor custo-benefício para melhorar a economia de combustível (Filipezyk 2013). Os TC são utilizados como uma forma de otimizar o uso da energia pelos motores de combustão interna, reaproveitando o potencial térmico ou de pressão dos gases lançados para a atmosfera (Semlitsch, Wang e Mihăescu 2014).

A Figura 1 mostra um TC em corte transversal, indicando seus principais componentes. O funcionamento do TC é acionado pela injeção dos gases da combustão pela carcaça da turbina (1), que provoca a rotação do rotor da turbina (2). Por meio de um eixo (3) que liga o rotor da turbina ao rotor do compressor (4), o ar da atmosfera é comprimido na carcaça do compressor (5) e direcionado para a câmara de combustão (Moreira 2016).

Figura 1. Turbocompressor em corte transversal. Fonte: adaptado de Moreira (2016).



2. MÉTODO DE PESQUISA

O desenvolvimento da presente pesquisa segue as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR ISO 14040 (ABNT 2009), dividida em quatro etapas principais: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação.

Na etapa de definição de objetivo e escopo, são contempladas as informações acerca da pretensão do estudo, bem como as características, fronteiras e função do sistema a ser estudado. Em seguida, na etapa de análise do inventário de ciclo de vida (ICV), os dados são coletados e organizados de acordo com as etapas definidas dentro da fronteira do sistema, realizando cálculos para alocação e liberação, quando necessário (ABNT 2009). Para isso, o ICV deste estudo

apresenta dados da observação direta dos processos, obtidos por meio de uma empresa fabricante de TC, localizada no interior do estado de São Paulo, Brasil.

Para a Análise do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) foram escolhidas categorias de impacto e uma metodologia condizente com o objetivo deste estudo. As categorias de impacto são as classes utilizadas para classificar os resultados da AICV, representando questões ambientais importantes (ABNT 2009).

O método adotado para AICV, do inglês *Environmental Development of Industrial Products 1997* (Departamento Ambiental de Produtos Industriais - EDIP 97), foi originado na *Technical University of Denmark* com abordagem direcionada aos danos ambientais. De acordo com Hauschild *et al.* (2005), esse método considera as seguintes categorias: 1) consumo de recursos; 2) aquecimento global; 3) depleção da camada de ozônio; 4) formação de ozônio fotoquímico; 5) acidificação; 6) eutrofização; 7) toxicidade humana; 8) ecotoxicidade.

A metodologia adotada (EDIP 1997) é determinada pelo cálculo, a partir de um fator de caracterização, que identifica as saídas referentes à categoria de impacto analisada. Para isso, as quantidades identificadas no ICV são multiplicadas pelo fator de caracterização determinado pelo próprio EDIP 97, retornando os potenciais de impacto de cada categoria analisada (Mendes, Bueno e Ometto 2015).

Como ferramenta de apoio para a condução do presente estudo foi utilizado o software GaBi® (versão 7.3.0.40). A versão 6.115 da base de dados foi consultada para a coleta de dados de forma secundária e para realizar a organização do ICV.

Na etapa de interpretação do ciclo de vida, os resultados obtidos nas demais etapas são analisados em relação ao objetivo e escopo inicialmente propostos, apresentando recomendações para o público alvo e tomadores de decisão.

2.1 Definição de objetivo e escopo

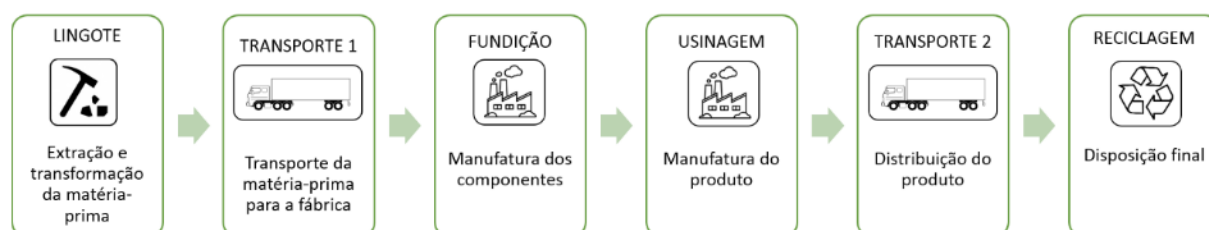
A unidade funcional do TC é medida em relação à potência adicional que o dispositivo proporciona em motores de combustão interna, sendo que no presente trabalho foi considerado um TC com potência de 76 CV. O dispositivo usado consiste em um TC empregado em motores movidos a diesel, da família OM-366 da Mercedes-Benz, em cujos componentes analisados são empregados 1,350 Kg de Al.

Na manufatura e montagem do TC são utilizados 70 componentes, sendo a maioria composta por elementos de fixação, enquanto os componentes de maior porte são fabricados a partir de diversos materiais, como alumínio, aço carbono, aço inox, bronze e superligas. Para o presente estudo, são considerados o rotor do compressor e a carcaça compressora, por se tratarem dos únicos

componentes produzidos em Al. A produção desses componentes a partir de Al ocorre pela viabilidade de obtenção de geometria complexa, elevada resistência à corrosão e peso reduzido.

O ciclo de vida analisado do TC foi dividido em seis etapas, conforme mostra a Figura 2 e descrito a seguir.

Figura 2. Fluxograma das etapas de produção do TC. Fonte: elaboração própria.



- a) Etapa 1 – Lingote – Extração e transformação da matéria-prima: abrange os processos considerados desde a extração do minério até o beneficiamento da matéria prima. O levantamento dos dados do inventário para essa etapa foi feito a partir do banco de dados do *software* GABI®, considerando os dados do instituto internacional de Al. A matéria-prima comum considerada pelos dados do software para produção de alumínio é a bauxita, composta principalmente de um ou mais compostos de hidróxido de alumínio, além de óxidos de sílica, ferro e titânio como as principais impurezas. O alumínio primário é produzido em usinas de eletrólise (também chamadas de fundidoras), onde a alumina pura é reduzida em metal de alumínio pelo processo Hall-Hérault. O alumínio fundido é transportado para a casa de fundição onde é ligado (de acordo com as necessidades do usuário) em fornos de espera pela adição de outros metais e sucata de alumínio limpos de óxidos e gases, e então fundido em lingotes. Todas essas etapas de beneficiamento estão contempladas pelos dados secundários do processo de extração e transformação da matéria prima em lingotes.
- b) Etapa 2 – Transporte 1 – Transporte da matéria-prima para a fábrica: foi considerado o transporte rodoviário entre o fornecedor e a unidade de manufatura do TC, sendo o carregamento médio de 3t de lingote de Al em uma distância média fornecida pela empresa de 300 km. O consumo estipulado foi definido segundo o *software* GABI® pela média de consumo Global com capacidade de até 5t. Segundo o inventário calculado, a média de consumo obtida para a distância considerada foi de 0,0038 kg de diesel para cada Kg de material transportado.
- c) Etapa 3 – Fundição – Manufatura dos componentes: consiste dos processos de produção dos componentes. Os componentes em Al (rotor e a carcaça) são produzidos a partir de fundição de precisão. Os dados relacionados ao inventário do processo de

- fundição de precisão foram obtidos de forma secundária pelo software GABI®, a partir da base de dados americana (USLCI).
- d) Etapa 4 – Usinagem – Manufatura do produto: após a fundição, as peças passam pelo processo de usinagem. Na sequência, as peças são agrupadas e enviadas para a etapa de montagem do TC. Os dados relacionados ao inventário do processo de usinagem foram obtidos de forma secundária pelo *software* GABI®, a partir da base de dados alemã (Selection DE: *aluminium cast part machining*).
 - e) Etapa 5 – Transporte 2 – Distribuição do produto: foi considerado o transporte rodoviário entre a unidade de manufatura do TC e os centros de revenda, com uma distância média fornecida pela empresa de 300 km. O consumo estipulado foi definido segundo o banco de dados do *software* GABI® pela média de consumo Global de forma análoga a etapa 2.
 - f) Etapa 6 – Reciclagem – Disposição final: consiste na desmontagem do TC, devido à troca ou falha, e destinação dos materiais para reciclagem. O dado relacionado ao percentual de utilização de 30% de material reciclado foi apresentado pela empresa. Já os dados relacionados ao inventário da reciclagem do alumínio para lingote foram obtidos de forma secundária segundo o *software* GABI®. Os dados são de origem da União Europeia (EU-27) para o ano de 2010.

Tanto o rotor do compressor, quanto a carcaça compressora, passam pelos mesmos processos de produção. Além destes processos, foram considerados os transportes entre as etapas de produção de lingote e fundição e após a montagem para disponibilização para o cliente. A etapa de reciclagem foi considerada por ser o destino mais comum atualmente praticado para este produto. Por falta de dados, não foi considerada a etapa de uso do produto.

Para o presente estudo, a alocação se faz necessária no processo de produção do lingote, uma vez que o Al é infinitamente reciclável no fim de vida do TC. Para a realização desta alocação, verificou-se, com base em dados da empresa, que 30% do material utilizado no processo de fundição é de origem reciclada. Desta forma, 70% do material utilizado é originado da extração primária, que está contida na avaliação da produção do lingote deste trabalho. Assim, assumindo que 30% do Al produzido de forma primária está sendo reciclado infinitas vezes, deve-se considerar que 30% dos impactos dos materiais são provenientes do processo de reciclagem e 70% dos impactos referentes à etapa de produção do lingote.

Os dados dos processos, como as etapas e processos envolvidos ao longo do ciclo de vida, foram obtidos de maneira primária, enquanto os detalhamentos destes dados foram obtidos de maneira secundária, por meio do banco de dados com fonte mundial do *software* GaBi®. Os dados coletados de origem primária, que correspondem aos processos utilizados no ciclo de vida dos componentes

de alumínio no TC e as distâncias percorridas em média pelos transportes rodoviários entre as etapas e o destino final do produto, foram convertidos para o padrão do *software*, utilizando massa em Kg e energia em MJ.

De acordo com os dados obtidos diretamente na indústria que produz o TC, o peso da carcaça compressora é de 1,250 Kg, enquanto do rotor do compressor é de 0,100 Kg. Como ambos os componentes apresentam mesma composição de material e os mesmos processos de produção, transporte e reciclagem, os pesos foram considerados de forma conjunta e todo o ICV foi realizado para a produção de 1,350 Kg de Al do TC.

A metodologia utilizada neste trabalho, EDIP 97, buscou analisar o consumo de recursos (entradas), considerando a quantidade mínima de 0,010 kg de recurso por 1,350 kg de alumínio processado, divididos entre renováveis e não renováveis. Ainda, foi analisado o consumo de energia, bem como os potenciais impactos ambientais associados às emissões (saídas) do ciclo de vida.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Inventário do Ciclo de Vida

Nesta seção serão apresentados os dados de entrada do ciclo de vida dos componentes de Al utilizados nos TC, sendo que a análise dos impactos resultantes das saídas será discutida na próxima seção. A Tabela 1 apresenta as principais entradas dos processos em relação aos recursos renováveis e não renováveis, seguido da Figura 3, que apresenta os recursos para o consumo de energia. Os dados apresentados foram obtidos a partir de fonte secundária e correspondem à unidade funcional de 76 cv e fluxo de referência de 1,350 kg de Al.

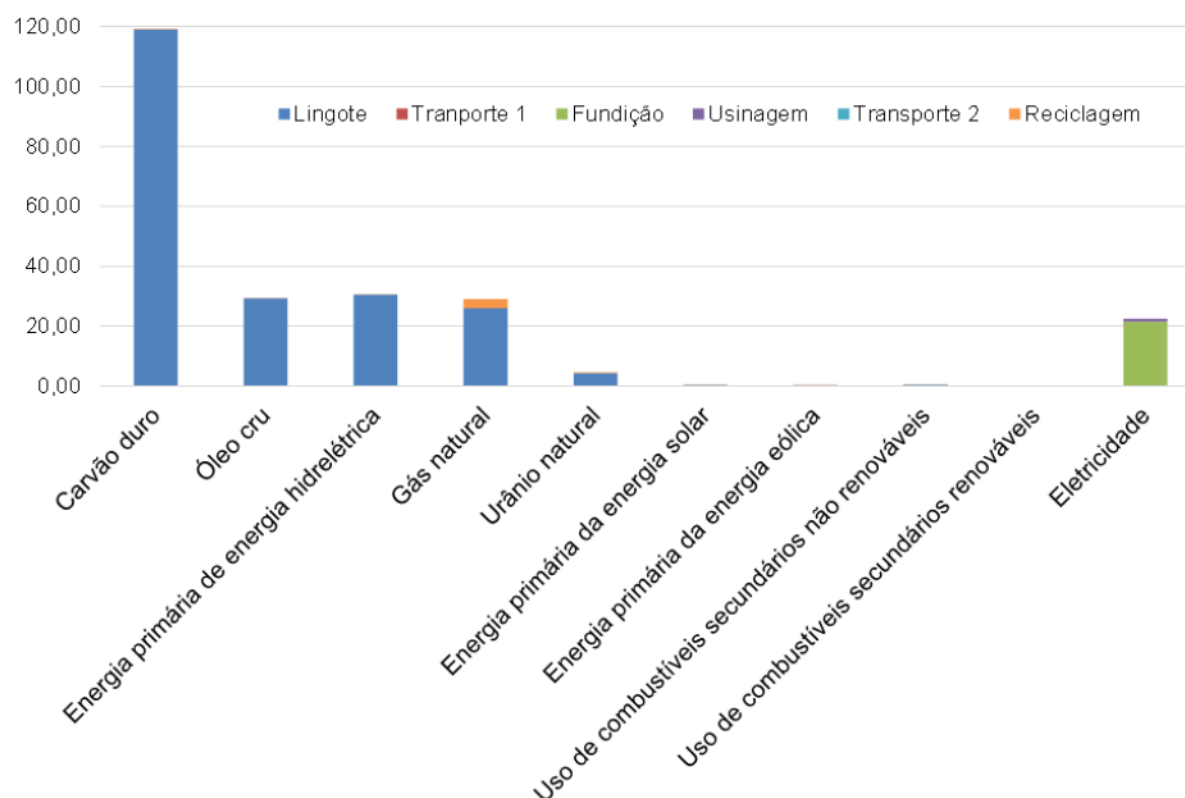
É possível observar que o processo de produção do lingote de Al é o que mais consome recursos, seja renovável, não renovável ou para consumo de energia. Por outro lado, a usinagem consome uma quantidade mínima de recursos, sendo baseado principalmente na eletricidade.

Tabela 1. Relação das entradas (kg) dos recursos renováveis e não renováveis para os processos ao longo do ciclo de vida do turbocompressor.

Substância	Recursos renováveis						Total
	Processos						
	Lingote	Transporte 1	Fundição	Usinagem	Transporte 2	Reciclagem	
Ar	67,97	-	-	-	-	4,12	101,22
Água	101.873	-	8,47	-	-	525,56	102.407,03
Dióxido de carbono	0,05	-	-	-	-	0,01	0,06
Recursos não renováveis							
Bauxita	6,75	-	-	-	-	-	9,64
Rocha inerte	14,36	-	-	-	-	0,17	20,68
Solo	0,40	-	-	-	-	0,00	0,57
Calcário	0,40	-	-	-	-	0,00	0,57
Cloreto de sódio	0,15	-	-	-	-	0,02	0,24
Argila	0,11	-	-	-	-	0,00	0,15
Areia	0,07	-	0,79	-	-	-	0,89
Diesel	-	0,01	-	-	0,01	-	0,02

Fonte: elaboração própria.

Figura 3. Consumo de energia (MJ) dos processos ao longo do ciclo de vida do turbocompressor. Fonte: elaboração própria.



3.2. Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

A seguir, as categorias de impacto são apresentadas em relação aos seus resultados, considerando a unidade de medida pertinente para cada uma delas e distribuída ao longo das etapas do ciclo de

vida dos turbocompressores. Destaca-se que os resultados obtidos consideram o fluxo de referência estabelecido anteriormente.

Inicialmente, a Tabela 2 mostra os resultados do potencial impacto ambiental relacionado à questão do aquecimento global, com unidade medida em kg de CO₂ equivalente. Desta forma, observa-se que a produção primária do Al, na forma de lingotes, é responsável por maior parte da emissão de CO₂, que abrange desde a extração da matéria-prima, até o processamento.

Tabela 2. Resultados para aquecimento global.

Processo	kg CO ₂ -eq	Contribuição % kg CO ₂ -eq
Lingote	18,290	89,744 %
Transporte 1	0,020	0,098 %
Fundição	1,826	8,959 %
Usinagem	0,000	0,000 %
Transporte 2	0,017	0,081 %
Reciclagem	0,228	1,118 %
Total	20,380	100 %

Fonte: elaboração própria.

Para a categoria de depleção da camada de ozônio (Tabela 3), os resultados são representados em µg de CFC-11 equivalente e processo de reciclagem possui o maior potencial causador desse impacto.

Tabela 3. Resultados para depleção da camada de ozônio.

Processo	µg CFC-11-eq	Contribuição % µg CFC-11-eq
Lingote	0,032	1,034 %
Transporte 1	0,000	0,000 %
Fundição	0,000	0,000 %
Usinagem	0,000	0,000 %
Transporte 2	0,000	0,000 %
Reciclagem	3,063	98,966 %
Total	3,095	100 %

Fonte: elaboração própria.

A Tabela 4 apresenta os resultados para os potenciais impactos relacionados com a formação de ozônio fotoquímico, classificado em g de C₂H₄ equivalente. Para essa categoria de impacto, temos a produção de lingote (44,5%) e a fundição (53,7%) como os principais processos causadores.

Tabela 4. Resultados para formação de ozônio fotoquímico.

Processo	g C ₂ H ₄ -eq	Contribuição % g C ₂ H ₄ -eq
Lingote	0,630	44,523 %
Transporte 1	0,001	0,071 %
Fundição	0,759	53,640 %
Usinagem	0,000	0,000 %
Transporte 2	0,001	0,071 %
Reciclagem	0,024	1,696 %
Total	1,415	100 %

Fonte: elaboração própria.

Em relação aos potenciais impactos na categoria de acidificação, representado na Tabela 5 em g de SO₂ equivalente, novamente a produção do lingote é o processo mais representativo, seguido da fundição.

Tabela 5. Resultados para acidificação.

Processo	g SO ₂ -eq	Contribuição % g SO ₂ -eq
Lingote	179,979	88,357 %
Transporte 1	0,007	0,000 %
Fundição	23,219	11,399 %
Usinagem	0,000	0,000 %
Transporte 2	0,006	0,003 %
Reciclagem	0,484	0,238 %
Total	203,695	100 %

Fonte: elaboração própria.

A seguir, na Tabela 6, os potenciais impactos para a categoria de eutrofização são apresentados por três tipos de indicadores diferentes, sendo cada um deles referentes a um tipo de substância emitida. Para as emissões relacionadas com g de P equivalente, os resultados são nulos em todos os processos, enquanto nas emissões relacionadas com g de N equivalente e g de NO₃ equivalente, os processos mais representativos são para produção do lingote e fundição.

Tabela 6. Resultados para eutrofização.

Processo	g N-eq	Contribuição % g N-eq	g P-eq	g NO ₃ -eq	Contribuição % g NO ₃ -eq
Lingote	41,026	79,904 %	0,000	180,690	79,903 %
Transporte 1	0,006	0,012 %	0,000	0,027	0,012 %
Fundição	10,195	19,856 %	0,000	44,902	19,856 %
Usinagem	0,000	0,000 %	0,000	0,000	0,000 %
Transporte 2	0,005	0,010 %	0,000	0,0023	0,001 %
Reciclagem	0,112	0,218 %	0,000	0,494	0,228 %
Total	51,344	100 %	0,000	226,136	100 %

Fonte: elaboração própria.

Para os impactos relacionados à toxicidade humana, os resultados são distribuídos por m³ de ar, água ou solo contaminado. A intensidade dos impactos varia conforme o meio em que as emissões ocorrem; portanto, os potenciais impactos ambientais para toxicidade humana causada por emissões no ar estão representados na Tabela 7, seguido da Tabela 8 para as emissões na água e Tabela 9 para as emissões no solo.

Tabela 7. Resultados das emissões no ar para a toxicidade humana.

Processo	m ³ ar	Contribuição % m ³ ar	m ³ água	Contribuição % m ³ água	m ³ solo	Contribuição % m ³ solo
Lingote	1,61E+09	93,605 %	9,45E+02	94,500 %	6,71E+00	93,584 %
Transporte 1	2,19E+03	0,000 %	2,11E-04	0,000 %	1,76E-03	0,025 %
Fundição	2,16E+05	0,013 %	4,51E-02	0,005 %	6,36E-02	0,887 %
Usinagem	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %
Transporte 2	1,85E+03	0,000 %	1,78E-04	0,000 %	1,49E-03	0,021 %
Reciclagem	1,05E+08	6,105 %	5,68E+01	5,680 %	3,99E-01	5,565 %
Total	1,72E+09	100 %	1,00E+03	100 %	7,17E+00	100 %

Fonte: elaboração própria.

Tabela 8. Resultados das emissões na água para a toxicidade humana.

Processo	m ³ ar	Contribuição % m ³ ar	m ³ água	Contribuição % m ³ água	m ³ solo	Contribuição % m ³ solo
Lingote	9,94E+05	82,149 %	4,41E+03	94,030 %	4,22E-01	85,253 %
Transporte 1	2,19E+03	0,181 %	2,11E-04	0,000 %	1,76E-03	0,356 %
Fundição	2,05E+05	16,942 %	2,45E-01	0,005 %	6,35E-02	12,828 %
Usinagem	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %
Transporte 2	1,85E+03	0,153 %	1,78E-04	0,000 %	1,49E-03	0,301 %
Reciclagem	1,12E+04	0,926 %	2,83E+02	6,034 %	6,44E-03	1,301 %
Total	1,21E+06	100 %	4,69E+03	100 %	4,95E-01	100 %

Fonte: elaboração própria.

Tabela 9. Resultados das emissões no solo para a toxicidade humana.

Processo	m ³ ar	Contribuição % m ³ ar	m ³ água	Contribuição % m ³ água	m ³ solo	Contribuição % m ³ solo
Lingote	7,84E+03	41,263 %	1,78E-01	41,204 %	3,48E-01	41,183 %
Transporte 1	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %
Fundição	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %
Usinagem	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %
Transporte 2	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %
Reciclagem	1,12E+04	58,947 %	2,54E-01	58,796 %	4,97E-01	58,817 %
Total	1,90E+04	100 %	4,32E-01	100 %	8,45E-01	100 %

Fonte: elaboração própria.

No mesmo sentido da categoria de toxicidade humana, os potenciais impactos ambientais para a ecotoxicidade dependem do meio em que as emissões ocorrem, tendo como resultado o m³ de água

ou solo contaminado. A Tabela 10 apresenta os potenciais impactos para as emissões lançadas no ar, seguido da Tabela 11 com as emissões na água e Tabela 12 para as emissões no solo.

Tabela 10. Resultados das emissões no ar para a ecotoxicidade.

Processo	m ³ água	Contribuição % m ³ água	m ³ solo	Contribuição % m ³ solo
Lingote	9,45E+01	72,692 %	1,95E+01	97,990 %
Transporte 1	3,73E-04	0,000 %	3,35E-04	0,002 %
Fundição	3,11E+01	23,923 %	2,24E-04	0,001 %
Usinagem	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %
Transporte 2	3,15E-04	0,000 %	2,83E-04	0,001 %
Reciclagem	4,71E+00	3,623 %	3,32E-01	1,668 %
Total	1,30E+02	100 %	1,99E+01	100 %

Fonte: elaboração própria.

Tabela 11. Resultados das emissões na água para a ecotoxicidade.

Processo	m ³ água	Contribuição % m ³ água	m ³ solo	Contribuição % m ³ solo
Lingote	6,83E+01	3,539 %	2,79E-03	99,643 %
Transporte 1	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %
Fundição	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %
Usinagem	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %
Transporte 2	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %
Reciclagem	1,86E+03	96,373 %	1,55E-05	0,554 %
Total	1,93E+03	100 %	2,80E-03	100 %

Fonte: elaboração própria.

Tabela 12. Resultados das emissões no solo para a ecotoxicidade.

Processo	m ³ água	Contribuição % m ³ água	m ³ solo	Contribuição % m ³ solo
Lingote	5,50E-08	93,379 %	4,99E-02	99,928 %
Transporte 1	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %
Fundição	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %
Usinagem	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %
Transporte 2	0,00E+00	0,000 %	0,00E+00	0,000 %
Reciclagem	3,92E-09	6,655 %	3,59E-05	0,072 %
Total	5,89E-08	100 %	4,99E-02	100 %

Fonte: elaboração própria.

3.3. Interpretação e recomendações para o ciclo de vida

O levantamento dos dados mostrou que a maior quantidade de recursos é consumida principalmente nos processos de fabricação do lingote e na reciclagem do Al. Para as categorias de impacto relacionadas com as saídas, a Tabela 13 apresenta o processo mais impactante para cada categoria, juntamente com o valor de potencial impacto e a representatividade.

O processo de produção do lingote de Al é o mais impactante para a maioria das categorias analisadas, com exceção para as categorias de depleção da camada de ozônio, formação de ozônio fotoquímico e ecotoxicidade para os impactos causados na água. Assim, os esforços para redução dos impactos no ciclo de vida do Al utilizado em TC devem ser direcionados principalmente para o processo de extração e beneficiamento da matéria-prima, que corresponde à produção do lingote de Al.

Tabela 13. Categorias de impacto e seus processos mais representativos.

Categoria de impacto	Processo	Valor	%
Aquecimento global	Lingote	18,290 kg CO ₂ -eq	90 %
Depleção da camada de ozônio	Reciclagem	3,063 µg CFC-11-eq	99 %
Formação de ozônio fotoquímico	Fundição	0,759 g C ₂ H ₄ -eq	54 %
Acidificação	Lingote	179,98 g SO ₂ -eq	88 %
Eutrofização – N	Lingote	41 g N-eq	80 %
Eutrofização – NO ₃	Lingote	181 g NO ₃ -eq	80 %
Toxicidade humana – ar	Lingote	1,72E+09 m ³	94 %
Toxicidade humana – água	Lingote	5,70E+03 m ³	94 %
Toxicidade humana – solo	Lingote	8,51E+00 m ³	88 %
Ecotoxicidade – água	Reciclagem	2,06E+03 m ³	90 %
Ecotoxicidade – solo	Lingote	1,99E+01 m ³	98 %

Fonte: elaboração própria.

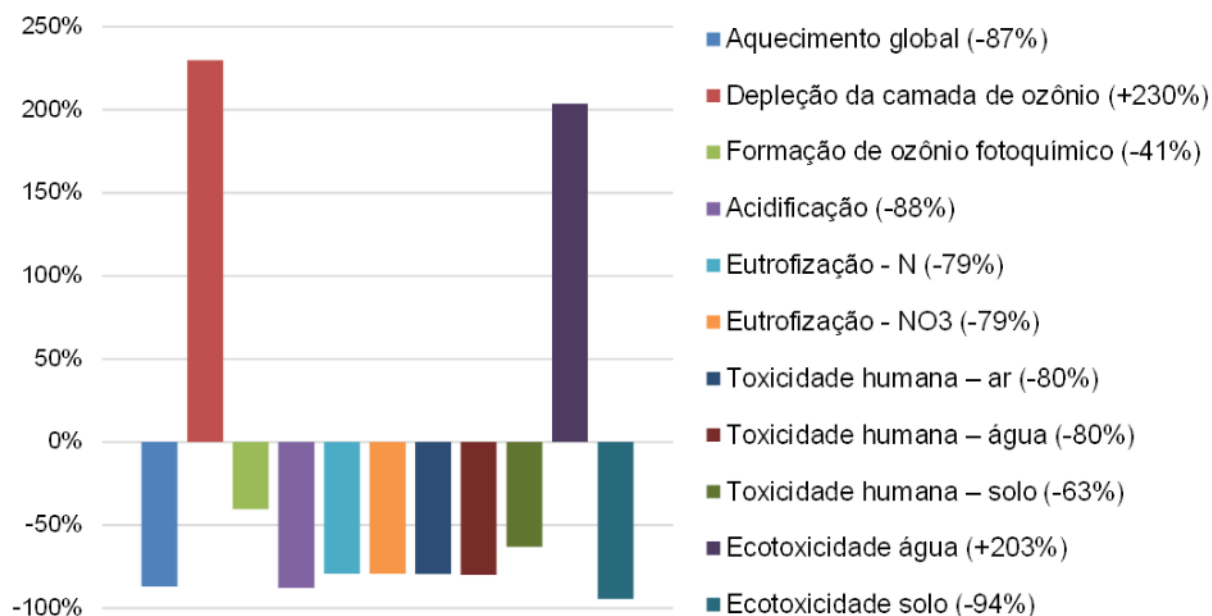
A intensificação do uso do processo de reciclagem do Al representa uma oportunidade de redução dos impactos ambientais no ciclo de vida analisado. Apesar de apresentar altos impactos relacionados à ecotoxicidade e depleção da camada de ozônio, a utilização de material reciclado é menos impactante do que a utilização de material virgem, assim como destacado em relatório da Comissão Europeia (EC 2018). Além disso, o processo de reciclagem utiliza quantidade menor de recursos, tanto renováveis, quanto não renováveis. Em relação à energia, o processo de reciclagem representa 1,7% do total utilizado para o processo de extração e beneficiamento do lingote de Al.

A Figura 4 representa a simulação de um cenário em que todo o Al utilizado no ciclo de vida dos TC é proveniente de material reciclado, descartando os impactos da extração e beneficiamento de matéria-prima virgem. Neste cenário, os impactos ambientais seriam reduzidos para a maioria das categorias de impacto, apesar de apresentar um crescimento expressivo para as categorias de depleção da camada de ozônio e ecotoxicidade na água.

Apesar de ter sido verificado vantagem no processo de reciclagem em comparação à exploração e beneficiamento da matéria-prima da natureza, reduções ainda maiores do impacto no ciclo de vida poderiam ser obtidas por meio da utilização de um sistema de remanufatura, que não é empregado atualmente na empresa.

De acordo com (Gao, Li, Tang, Peng e Zhang 2017), os impactos ambientais de turbocompressores remanufaturados são consideravelmente menores do que os turbocompressores recém-fabricados. Além de reduzir em até 90,84% o potencial de depleção da camada de ozônio, a remanufatura ainda representa uma oportunidade redução de 82,55% da demanda por energia no ciclo de vida dos turbocompressores.

Figura 4. Variação dos impactos ambientais para um cenário com 100% do material reciclado. Fonte: elaboração própria.



Fonte: elaboração própria.

Ainda, Kalverkamp e Raabe (2018) destacam a importância da remanufatura para produtos que possuem alto valor intrínseco, como é o caso dos turbocompressores, que apresentam altos custos relacionados ao desenvolvimento. Além de serem 30-50% mais baratas, as peças remanufaturadas tem a mesma garantia e são submetidas aos mesmos testes de controle da qualidade que as peças novas (EMF 2012).

4. CONCLUSÃO

No presente trabalho foram avaliados os potenciais impactos associados ao ciclo de vida do alumínio utilizado em turbocompressores para veículos pesados, tomando como base a técnica de Avaliação do Ciclo de Vida. Para a análise dos impactos foi utilizado o método EDIP 97, considerando sete categorias de impactos diferentes e possibilitando a identificação dos processos que devem ser priorizados para ações de melhorias.

O processo de extração e beneficiamento da matéria-prima constitui como o mais impactante ao longo do ciclo de vida, tanto no consumo de recursos, quanto nas emissões geradas. Assim, como forma de mitigação desses impactos, foi simulado um cenário em que o Al fosse totalmente

reciclado e utilizado no sistema, descartando a necessidade de produção de matéria-prima virgem. Esse cenário se mostrou viável para a maioria das categorias de impactos analisadas, com exceção para a depleção da camada de ozônio e ecotoxicidade na água.

Ainda, a partir de dados encontrados na literatura (Gao et al. 2017), outra sugestão de melhoria para o presente ciclo de vida é a implementação de um sistema de remanufatura, tendo em vista que essa atividade reduziria os impactos associados com a extração da matéria-prima, ao passo em que os impactos com a reciclagem também seriam reduzidos.

O cenário atual do ciclo de vida dos TC, em que 30% do Al utilizado é de origem reciclada, se mostra significativamente mais impactante do que os cenários com 100% de material reciclado ou remanufaturado. Assim, é importante que sejam desenvolvidas ações no sentido de intensificar a utilização de material reciclado e de estratégias para a remanufatura.

Como principal limitação, o presente trabalho se baseia principalmente em dados de fonte secundária, obtidos a partir do *software* GaBi®. Além disso, as informações acerca dos transportes correspondem a um valor médio estipulado pela empresa. Como proposta de trabalho futuro, deve-se conduzir uma análise quantitativa de diferentes estratégias para redução dos impactos ambientais do ciclo de vida, identificando a viabilidade técnica, ambiental e econômica da remanufatura e abolição do uso de matéria-prima virgem.

REFERÊNCIAS

- ABNT [ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS], 2009. *ABNT NBR ISO 14040: 2009 Versão Corrigida: 2014: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e Estrutura*. Brasil. Rio de Janeiro, RJ: ABNT.
- ALVES, Adilson Rangel and COUTINHO, Aparecido dos Reis, 2019. Life cycle assessment of niobium: A mining and production case study in Brazil. *Minerals Engineering* [online]. March 2019. Vol. 132, p. 275–283. [Accessed 19 October 2018]. DOI [10.1016/j.mineng.2018.11.041](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.041). Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892687518305260>
- BRAGHIROLI, Felipe Luiz, MEDEIROS, Diego Lima, DIAS, Jairo and SENSI FILHO, Paulo, 2018. Avaliação do Ciclo de Vida da produção de barbante proveniente retalho têxtil. *LALCA - Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida* [online]. 19 November 2018. P. 48–65. [Accessed 19 October 2018]. DOI [10.18225/lalca.v2iEspec.4356](https://doi.org/10.18225/lalca.v2iEspec.4356). Available from: <http://172.25.0.53/ojs3/index.php/lalca/article/view/4356>
- CHEN, Jingjing, WANG, Zhaohui, WU, Yufeng, LI, Liquan, LI, Bin, PAN, De'an and ZUO, Tieyong, 2019. Environmental benefits of secondary copper from primary copper based on life cycle assessment in China. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. July 2019. Vol. 146, p. 35–44. [Accessed 19 October 2018]. DOI [10.1016/j.resconrec.2019.03.020](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.020). Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344919301260>
- EC [EUROPEAN COMMISSION], 2018. Science for Environment Policy: Understanding aluminium scrap qualities can contribute to circular economy goals. *European Commission DG Environment News Alert Service* [online]. 19 July 2018. [Accessed 19 September 2019]. Available from: https://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/understanding_aluminium_scrap_qualities_can_contribute_to_circular_economy_goals_austria_511na4_en.pdf

- EMF [ELLEN MACARTHUR FOUNDATION], 2012. The Circular Economy Applied to the Automotive Industry. [online]. 9 October 2012. [Accessed 10 August 2019]. Available from: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/news/the-circular-economy-applied-to-the-automotive-industry-2>
- FILIPCZYK, Jan, 2013. Causes of automotive turbocharger faults. *Transport Problems* [online]. 2013. Vol. 8, no. 2. Available from: http://www.transportproblems.polsl.pl/pl/Archiwum/2013/zeszyt2/2013t8z2_01.pdf
- GAO, Wang, LI, Tao, TANG, Zijue, PENG, Shitong and ZHANG, Hong-chao, 2017. Investigation on the Comparative Life Cycle Assessment between Newly Manufacturing and Remanufacturing Turbochargers. *Procedia CIRP* [online]. 2017. Vol. 61, p. 750–755. [Accessed 19 October 2018]. DOI [10.1016/j.procir.2016.11.214](https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.214). Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221282711631383X>
- HAUSCHILD, M., JESWIET, J. and ALTING, L., 2005. From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives. *CIRP Annals* [online]. 2005. Vol. 54, no. 2, p. 1–21. [Accessed 19 October 2018]. DOI [10.1016/S0007-8506\(07\)60017-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60017-1). Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607600171>
- KALVERKAMP, Matthias and RAABE, Thorsten, 2018. Automotive Remanufacturing in the Circular Economy in Europe: Marketing System Challenges. *Journal of Macromarketing* [online]. March 2018. Vol. 38, no. 1, p. 112–130. [Accessed 19 October 2018]. DOI [10.1177/0276146717739066](https://doi.org/10.1177/0276146717739066). Available from: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0276146717739066>
- KATSANOS, C.O., HOUNTALAS, D.T. and ZANNIS, T.C., 2013. Simulation of a heavy-duty diesel engine with electrical turbocompounding system using operating charts for turbocharger components and power turbine. *Energy Conversion and Management* [online]. December 2013. Vol. 76, p. 712–724. [Accessed 19 October 2018]. DOI [10.1016/j.enconman.2013.08.022](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.022). Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890413004810>
- LIU, Gang and MÜLLER, Daniel B., 2012. Addressing sustainability in the aluminum industry: a critical review of life cycle assessments. *Journal of Cleaner Production* [online]. November 2012. Vol. 35, p. 108–117. [Accessed 19 October 2018]. DOI [10.1016/j.jclepro.2012.05.030](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.030). Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652612002533>
- MENDES, Natalia Crespo, BUENO, Cristiane and OMETTO, Aldo Roberto, 2015. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. *Production* [online]. 24 November 2015. Vol. 26, no. 1, p. 160–175. [Accessed 19 October 2018]. DOI [10.1590/0103-6513.153213](https://doi.org/10.1590/0103-6513.153213). Available from: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132016000100160&lng=pt&tlng=pt
- MOREIRA, M.F., 2016. Failure analysis in aluminium turbocharger wheels. *Engineering Failure Analysis* [online]. March 2016. Vol. 61, p. 108–118. [Accessed 19 October 2018]. DOI [10.1016/j.engfailanal.2015.11.024](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.024). Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350630715301461>
- NIERO, Monia and OLSEN, Stig Irving, 2016. Circular economy: To be or not to be in a closed product loop? A Life Cycle Assessment of aluminium cans with inclusion of alloying elements. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. November 2016. Vol. 114, p. 18–31. [Accessed 19 October 2018]. DOI [10.1016/j.resconrec.2016.06.023](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.06.023). Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344916301604>
- OLIVEIRA, Camila Gomes Henriques de, SILVA, Diogo Aparecido Lopes and OLIVEIRA, José Augusto de, 2018. Gestão do Ciclo de Vida (GCV) para a sustentabilidade de Pequenas e Médias Empresas (PMEs) na região de Sorocaba/SP: principais entraves e desafios. *LALCA - Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida* [online]. 19 November 2018. P. 23–47. [Accessed 19 October 2018]. DOI [10.18225/lalca.v2iEspec.4351](https://doi.org/10.18225/lalca.v2iEspec.4351). Available from: <http://revista.ibict.br/lalca/article/view/4351>
- SEMLITSCH, Bernhard, WANG, Yue and MIHĂESCU, Mihai, 2014. Flow effects due to pulsation in an internal combustion engine exhaust port. *Energy Conversion and Management* [online]. October 2014. Vol. 86, p. 520–536. [Accessed 19 October 2018]. DOI [10.1016/j.enconman.2014.06.034](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.034). Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890414005597>
- SEVIGNÉ-ITOIZ, Eva, GASOL, Carles M., RIERADEVALL, Joan and GABARRELL, Xavier, 2014. Environmental consequences of recycling aluminum old scrap in a global market. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. August 2014. Vol. 89, p. 94–103. [Accessed 19 October 2018]. DOI [10.1016/j.resconrec.2014.05.002](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.05.002). Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344914001086>

SILVA, Diogo A. Lopes, DE OLIVEIRA, José Augusto, PADOVEZI FILLETI, Remo Augusto, GOMES DE OLIVEIRA, João Fernando, JANNONE DA SILVA, Eraldo and OMETTO, Aldo Roberto, 2018. Life Cycle Assessment in automotive sector: A case study for engine valves towards cleaner production. *Journal of Cleaner Production* [online]. May 2018. Vol. 184, p. 286–300. [Accessed 19 October 2018]. DOI [10.1016/j.jclepro.2018.02.252](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.252). Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618305845>

SUN, Harold, HANNA, Dave, HU, Liangjun, CURTIS, Eric, YI, James and TJONG, Jimi, 2014. Steady State Engine Test Demonstration of Performance Improvement With an Advanced Turbocharger. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* [online]. 1 July 2014. Vol. 136, no. 7, p. 072601. [Accessed 19 October 2018]. DOI [10.1115/1.4026611](https://doi.org/10.1115/1.4026611). Available from: <https://asmedigitalcollection.asme.org/gasturbinespower/article/doi/10.1115/1.4026611/373725/Steady-State-Engine-Test-Demonstration-of>

SVERDRUP, Harald U., RAGNARSDOTTIR, Kristin Vala and KOCA, Deniz, 2015. Aluminium for the future: Modelling the global production, market supply, demand, price and long term development of the global reserves. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. October 2015. Vol. 103, p. 139–154. [Accessed 19 October 2018]. DOI [10.1016/j.resconrec.2015.06.008](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.06.008). Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344915300276>