



“TEN YEARS WORKING TOGETHER FOR A SUSTAINABLE FUTURE”

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no setor automotivo: estudo de caso numa indústria de válvulas de escape

LOPES SILVA, D. A. ^a, OLIVEIRA, J. A. ^b, SILVA, E. J. ^c, OMETTO, A. R. ^c

a. Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Sorocaba/SP

b. Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho” (UNESP), São João da Boa Vista/SP

c. Universidade de São Paulo (USP), São Carlos/SP

**Corresponding author, diogo.apls@ufscar.br*

Resumo

Dependendo do setor produtivo e do tipo de produto, os impactos ambientais dos produtos postos no mercado podem ser mais significativos para fora do “portão da fábrica”, isto é, esses impactos podem estar mais associados às etapas à montante e/ou à jusante da manufatura. Este é o caso normalmente presente na indústria automotiva, onde é comum ocorrer dos impactos ambientais de veículos e seus componentes serem mais significativos durante a fase de uso dos mesmos, comparativamente às etapas de manufatura. Assim, este artigo objetiva contribuir para mais pesquisas envolvendo estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) no setor automotivo, com foco no caso envolvendo a produção de válvulas de escape no Brasil. Para isso, a ACV foi aplicada na visão *cradle-to-grave* das válvulas, e os resultados apontaram que mais de 90% dos impactos se devem à fase de uso das mesmas, nos motores de veículos para passeio. Treze categorias de impacto foram avaliadas, das quais destacaram-se o potencial de aquecimento global, potencial de formação de material particulado, e o potencial de toxicidade humana. Sugestões de melhoria foram propostas para minimizar parte dos *hotspots* ambientais identificados no estudo.

Palavras-chave: Gestão Ambiental. Produção Sustentável. Indústria Automotiva. Gestão do ciclo de vida.

1. Introdução

A produção exerce um papel fundamental na estratégia das empresas do setor de manufatura, e os seus processos são responsáveis por uma parcela significativa dos impactos ambientais causados ao longo do ciclo de vida de um produto (DUFLOU; KELLEN; DEWULF, 2011; DORNFELD, 2014).

Há importantes iniciativas que visam prevenir e minimizar os impactos ambientais decorrentes da produção, tais como: a Produção mais limpa (P+L), segundo mencionado por UNIDO/UNEP (2004) e Oliveira et al. (2016); o *Green Manufacturing* (GM) destacado por Dornfeld et al. (2013), Silva (2016) e Silva, Silva e Ometto. (2016); e pesquisas mais recentes que estão sendo dedicadas à integração destas estratégias ambientais junto à Produção Enxuta (PE) (OLIVEIRA, 2016).

A PE vem conquistando espaço no meio industrial desde 1992, quando ganhou o ocidente e atualmente vem sendo utilizada por outros segmentos empresariais devido ao seu grande potencial de eliminar

“TEN YEARS WORKING TOGETHER FOR A SUSTAINABLE FUTURE”

São Paulo – Brazil – May 24th to 26th - 2017

desperdícios, melhorar processos produtivos e gerar valor (WOMACK; JONES, 2004; LIKER, 2005; OLIVEIRA, 2016). Nessa linha, diversos estudos sugerem que a PE gera ganhos de ordem ambiental à manufatura das empresas (MILLER; PAWLOSKI; STANDRIDGE, 2010; SONG; LIANG, 2011). Já outros trabalhos afirmam que a PE auferir ganhos ambientais às empresas, se integradas às estratégias ambientais como a P+L e o GM (WU; LOW, 2013; PAMPANELLI; FOUND; BERNARDES, 2014).

À despeito do potencial ambiental desta integração ou da prática da P+L e da GM de formas independentes da PE, ainda se observa uma lacuna na avaliação dos impactos ambientais nos processos produtivos das empresas. Assim, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) vem se apresentando como uma das principais técnicas para esta finalidade (KELLENS, et al, 2012a;b; SILVA; SILVA; OMETTO 2016).

Muitos estudos sugerem que este campo foi ainda pouco explorado e que há a necessidade de aprofundamentos visando a obtenção de melhores indicadores e resultados para a melhoria de processos produtivos com uma Visão de Ciclo de Vida de Produto, e não limitada apenas ao escopo da manufatura (LINKE; HUANG; DORNFELD, 2012; ZENDOIA, et al, 2014; SHIN, 2015).

Há influência que a produção exerce sobre toda a cadeia à montante e à jusante da etapa manufatura pode ser relevante, dependendo do tipo de produto e do seu respectivo ciclo de vida projetado (DORNFELD, 2014). Indústrias automotivas se destacam neste sentido, pois conforme Warsen e Krinke (2012), muitas vezes os impactos ambientais da fase de uso dos veículos automotivos superam os impactos da manufatura de seus componentes, e da própria montagem do veículo. Nesses casos, faz-se necessária a aplicação de técnicas como a ACV, para permitir um melhor entendimento sobre a magnitude e a fonte desses impactos ambientais no ciclo de vida do produto.

Alguns estudos foram dedicados à aplicação da ACV em produtos ou componentes automotivos. Nakano e Shibahara (2017) avaliaram as emissões atmosféricas resultantes de resíduos de ferro no fim de vida do produto automotivo, enaltecendo a significativa redução das emissões de gases do efeito estufa quando estes resíduos são reciclados ao invés de simplesmente dispostos em aterros.

Schoggl, Baumgartner e Hofer (2017) propuseram uma ferramenta de análise qualitativa em complemento à ACV, para a fase de projeto do produto com vistas à aplicação do Ecodesign no setor automotivo. Já Delogu et al. (2016) integraram a ACV ao método Custeio do Ciclo de Vida (CCV) para avaliar os impactos ambientais e seus custos durante a fase de uso de um componente automotivo. Finalmente, Davidson, Alistair e Binks (2016) demonstraram a redução dos impactos ambientais de uma bateria automotiva pela redução do uso de chumbo em sua composição.

Contudo, há poucos estudos de ACV aplicados na indústria automotiva brasileira, e menos ainda, ao se pesquisar sobre trabalhos dedicados ao estudo de válvulas automotivas. Neste sentido, com vistas a ampliar os estudos no âmbito da ACV no setor automotivo, o objetivo deste trabalho foi aplicar a ACV numa indústria produtora de válvulas, com foco em identificar potenciais melhorias ambientais dos processos de fabricação estudados sob a Visão de Ciclo de Vida de Produto.

2. Metodologia

2.1. Procedimentos

Este estudo tem como procedimento de pesquisa o estudo de caso (YIN, 2001). Assim, o desenvolvimento deste artigo se deu em quatro fases, tendo como primeiro momento a escolha da indústria automotiva no Brasil para realização do estudo de ACV. A segunda fase foi coleta de dados na empresa escolhida, por meio de consulta a registros de consumo de recursos (materiais e energia) e de geração de resíduos (sólidos, efluentes) e emissões na etapa de manufatura. Posteriormente, foram também coletados dados referentes as etapas à montante (obtenção das matérias primas) e à jusante (uso e pós-uso) do ciclo de vida das válvulas para permitir a modelagem completa, *cradle-to-grave*, do ciclo de vida do produto estudado. A terceira fase foi a modelagem da ACV conforme as normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044, e mediante a utilização do software GaBi 6.5 e de seu banco de dados

profissional. A quarta fase, foi a interpretação dos resultados da ACV com foco nas categorias de impacto selecionadas mediante utilização do método ILCD/PEF recommendation v.1.06 (EC/JRC/IES, 2010).

2.2. Descrição do estudo de caso

Situada no Estado de São Paulo, foi estudada uma fabricante de válvulas para uso em motores de veículos. Pela Figura 1, a válvula automotiva pode ser do tipo admissão ou escape, sendo que as válvulas de admissão controlam a entrada da mistura combustível/ar no cilindro do motor, enquanto que as válvulas de exaustão controlam a liberação dos gases de combustão.

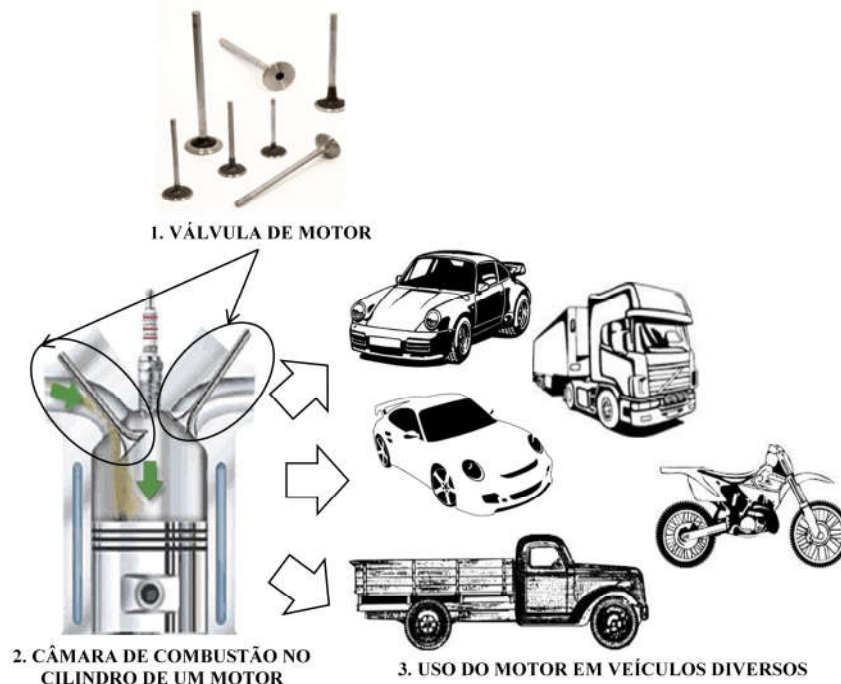


Fig. 1. Visão geral da aplicação de válvulas de motor na indústria automotiva. Fonte: Silva (2016).

Em relação ao formato das válvulas, na Figura 2 são apresentadas suas principais características construtivas. As válvulas são comercializadas em função do tipo de veículo (veículo de passeio, caminhão, etc.), tipo de motor, tipo de combustível, tipo de material (aços-liga, altas ligas, superligas), e função (admissão, escape). Logo, as dimensões D , d , L , l , e ϕ , dependem dessas características.

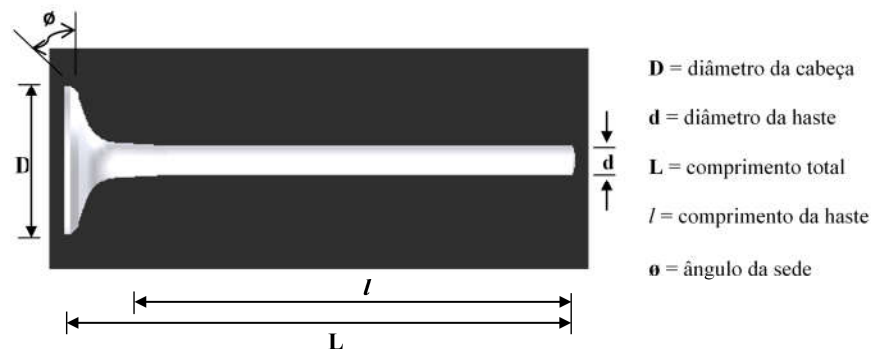


Fig. 2. Visão geral das características construtivas de uma válvula de motor. Fonte: Silva (2016).

Foi selecionado o modelo de válvula de escape/exaustão feita de aço cromo-silício e superliga, utilizada em veículos de passeio (quatro rodas). O uso da válvula ocorre em motores que requerem oito válvulas por motor, pois há duas válvulas em cada um dos quatro cilindros de motor. Porém, apenas quatro válvulas são de escape. O modelo de válvula escolhida é um dos principais produtos da empresa, correspondendo à produção de 14,0 mil válvulas/dia, e sendo exportada aos Estados Unidos.

2.3. Aplicação das quatro etapas da ACV

Baseando-se nas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044, o próximo passo foi estabelecer a unidade funcional e o fluxo de referência pela Tabela 1. Foi definido também do sistema de produto da Figura 3.

Tabela 1: Produto, função, unidade funcional e fluxo de referência.

Produto	Função	Unidade funcional	Fluxo de referência
Válvula de escape para uso em motores de veículos de passeio movidos à gasolina.	Assegurar que a câmara de combustão esteja selada durante a ignição, e controlar a liberação dos gases de combustão.	A vedação da câmara de combustão e o controle da emissão dos gases da queima para 300.000 km rodados, utilizando veículo de passeio movido à gasolina.	A produção de quatro válvulas feitas de aço cromo-silício e superliga.

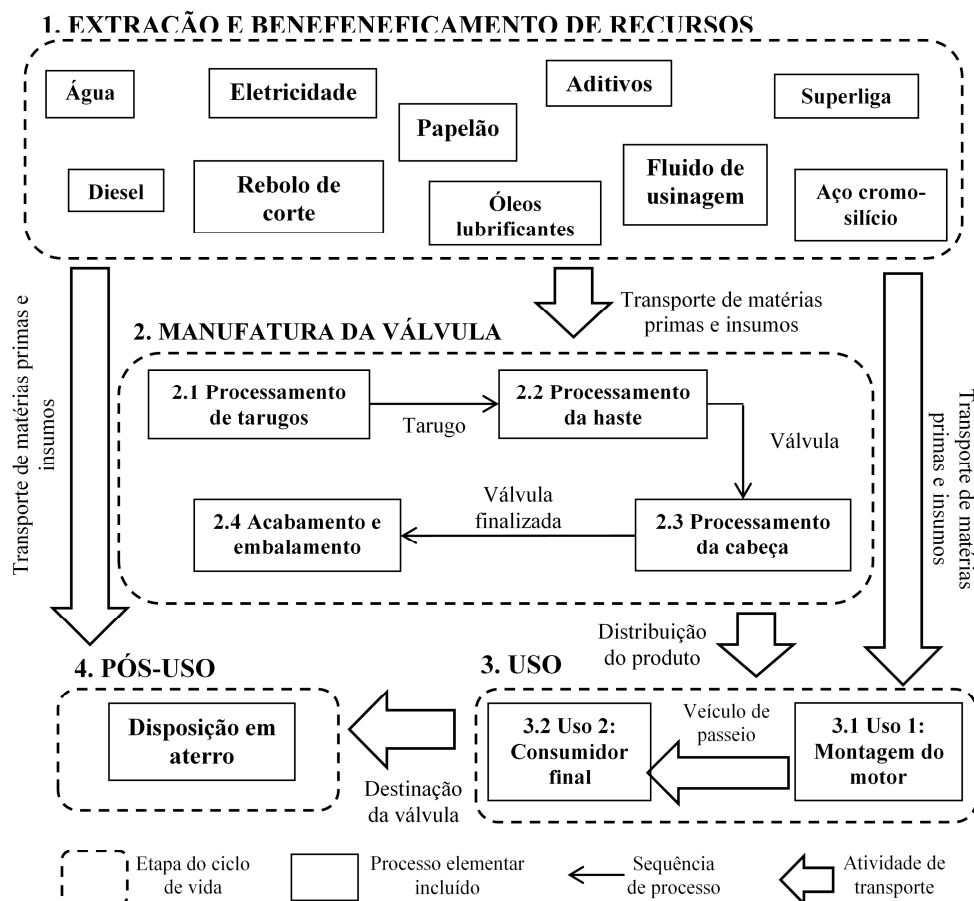


Fig. 3. Sistema de produto do estudo de caso. Fonte: Silva (2016).

O sistema de produto da Figura 3 apresenta quatro etapas de ciclo de vida de produto. Recursos como rebolo de corte, fluido de usinagem, ligas metálicas, e eletricidade, são os principais fluxos de entrada para a manufatura das válvulas. A fase de uso foi dividida em uso 1 (uso das válvulas na montagem do motor), e uso 2 (uso do motor de veículo pelo consumidor final). Já a Figura 4 apresenta o diagrama de fluxo de processo da etapa de manufatura das válvulas.

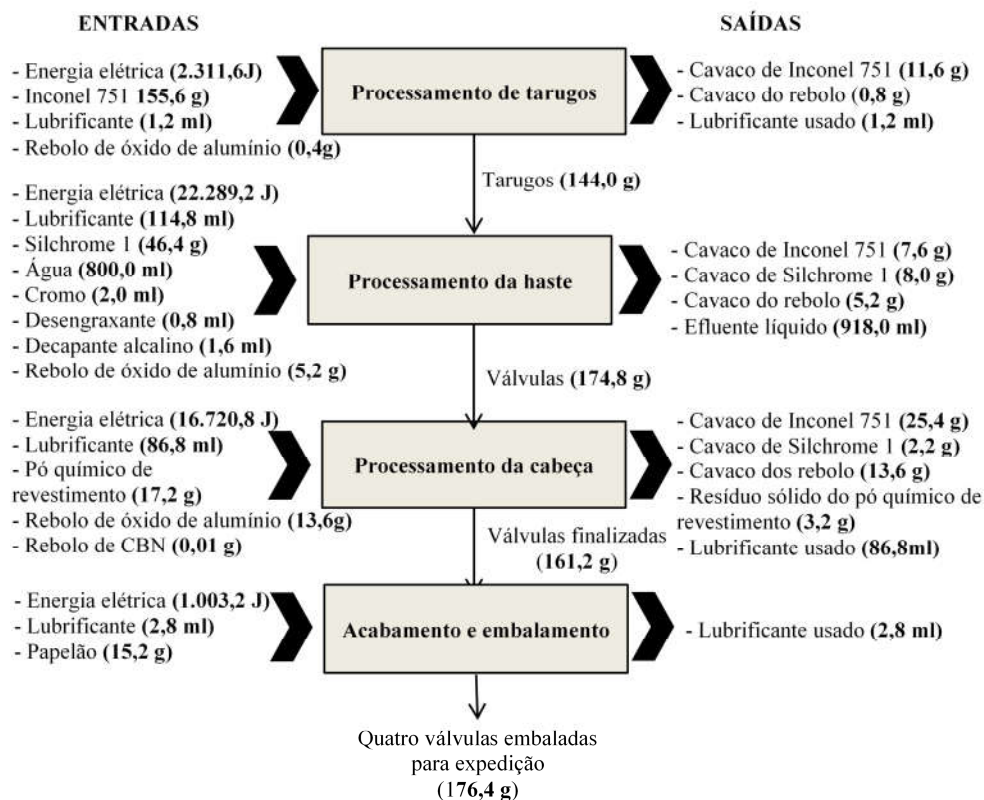


Fig. 4. Sistema de produto do estudo de caso. Fonte: Silva (2016).

Nesse fluxograma, foram definidas as matérias primas que constituem as válvulas, sendo que o aço cromo-silício foi o Silchrome 1, enquanto que a superliga foi o Inconel 751. O Silchrome 1 é empregado na manufatura da cabeça das válvulas, enquanto o Inconel 751 compõe a haste das mesmas.

3. Resultados

3.1. Análise do inventário do ciclo de vida de produto

Os dados de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) das válvulas automotivas foram obtidos de fontes primárias e secundárias, sendo que os fluxos diretos de inventário estão apresentados na Tabela 2. Os principais aspectos ambientais inventariados durante a manufatura foram o consumo de eletricidade, fluido de corte, e rebolo de corte.

Para a quantificação dos fluxos indiretos de inventário foram utilizados o banco de dados do software GaBi 6.5 e dados da literatura. Foi assumido o critério de corte mássico de 95,0% de todos os fluxos de entrada diretos do sistema de produto. Os fluxos indiretos de inventário foram obtidos levando-se em conta as realidades brasileira e europeia. Os dados referentes à realidade geopolítica europeia foram adotados neste estudo devido à indisponibilidade das respectivas informações para o caso do Brasil. A partir do software GaBi, foram incluídos dados referentes as cadeias de extração e fornecimento de água potável (Europa); cadeia de produção do aço, ferro fundido, manganês, silício,

enxofre, e alumínio (materiais de base que compõe as ligas metálicas de Inconel 751 e Silchrome 1) (Brasil/Europa); cadeia de produção do diesel combustível (Brasil); cadeia de produção da energia elétrica (Brasil); cadeia de produção da gasolina (Brasil); cadeia de produção do papelão (Europa); cadeia de produção do óleo pesado combustível (Brasil). Já os dados referentes a cadeia de produção do rebolo de óxido de alumínio, e a cadeia de produção do rebolo de CBN, foram ambas obtidas pelo trabalho de Filleti (2015), para o contexto Europeu.

Tabela 2: Resultados de ICV para o estudo de caso.

	Entradas		Saídas	
Manufatura	▪ Diesel*	2,0 g	▪ Dióxido de carbono*	6,4 g
			▪ Monóxido de carbono*	1,3E-05 g
	<i>Processamento de tarugos</i>			
	▪ Energia elétrica	2.311,6 J	▪ Cavaco de Inconel 751	11,6 g
	▪ Inconel 751	155,6 g	▪ Cavaco do rebolo	0,8 g
	▪ Lubrificante	1,2 ml	▪ Lubrificante usado	1,2 ml
	▪ Rebolo de óxido de alumínio	0,8 g		
	<i>Processamento da haste das válvulas</i>			
	▪ Energia elétrica	22.289,2 J	▪ Cavaco de Inconel 751	7,6 g
	▪ Lubrificante	114,8 ml		
	▪ Silchrome 1	46,4 g	▪ Cavaco de Silchrome 1	8,0 g
	▪ Água	800,0 ml		
	▪ Cromo	2,0 ml	▪ Cavaco do rebolo	5,2 g
	▪ Desengraxante	0,8 ml		
	▪ Decapante alcalino	1,6 ml	▪ Efluente líquido	918,0 ml
	▪ Rebolo de óxido de alumínio	5,2 g		
	<i>Processamento da cabeça das válvulas</i>			
	▪ Energia elétrica	16.720,8 J	▪ Cavaco de Inconel 751	25,4 g
Uso	▪ Lubrificante	86,8 ml	▪ Cavaco de Silchrome 1	2,2 g
	▪ Pó químico de revestimento	17,2 g	▪ Cavaco dos rebolos	13,6 g
	▪ Rebolo de CBN	0,01 g	▪ Resíduo do pó de revestimento	3,2 g
	▪ Rebolo de óxido de alumínio	13,6 g	▪ Lubrificante usado	86,8 ml
	<i>Acabamento e embalagem</i>			
	▪ Energia elétrica	1.003,2 J		
	▪ Lubrificante	2,8 ml	▪ Lubrificante usado	2,8 ml
	▪ Papelão	15,2 g		
	<i>Uso 1: uso do válvula na montagem do motor</i>			
	▪ Válvulas de escape	176,4 g	▪ Dióxido de carbono*	23,2 g
	▪ Diesel*	1,4 g	▪ Monóxido de carbono*	0,07 g
	▪ Óleo pesado*	6,0 g	▪ Resíduo sólido papelão	15,2 g
	<i>Uso 2: uso do válvula de veículo</i>			
	▪ Diesel*	0,14 g	▪ Dióxido de carbono*	0,40 g
			▪ Dióxido de carbono**	5,4E+04 kg
			▪ Monóxido de carbono*	9,0E-04 g
	▪ Gasolina**	1,7E+04 kg	▪ Dióxido de enxofre**	2,5 kg
			▪ Válvulas usadas	161,2 g
Pós-uso	<i>Disposição em aterro</i>			
	▪ Diesel*	0,31 g	▪ Dióxido de carbono*	0,8 g
	▪ Válvulas usadas	161,2 g	▪ Monóxido de carbono*	2,0E-03 g
			▪ Válvulas usadas	161,2 g

* Emissões de CO₂ e CO devido ao consumo de diesel e óleo pesado em atividades de transporte;

** Emissões de CO₂ e SO₂ diretamente relacionados ao consumo de gasolina.

3.2. Avaliação do impacto do ciclo de vida de produto

Com base no ICV obtido, foi então realizada a avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) via aplicação do método ILCD/PEF recommendation v. 1.06 e suas treze categorias de impacto. As seguintes categorias de impacto foram selecionadas: Potencial de Acidificação (PA), Potencial de Aquecimento Global (PAG), Potencial de Depleção da Camada de Ozônio (PDCO), Potencial de Depleção de Recursos Abióticos (fóssil e mineral) (PDRA), Potencial de Eutrofização para Água Doce (PEAD), Potencial de Ecotoxicidade para Água Doce (PEcAD), Potencial de Formação Fotoquímica de Ozônio (PFFO), Potencial de Formação de Material Particulado/Inorgânicos Respiratórios (PFMP), Potencial de Eutrofização Marinha (PEM), Potencial de Eutrofização Terrestre (PET), Potencial de Radiação Ionizante (PRI), Potencial de Toxicidade Humana – Efeitos Carcinogênicos (PTHC), e Potencial de Toxicidade Humana – Efeitos Não Carcinogênicos (PTHNC).

Os resultados foram normalizados conforme os fatores de normalização “PEF Pilot, incl biogenic carbon [Person equivalent]”, disponíveis no software GaBi 6.5. A Figura 5 apresenta os resultados normalizados por etapa do ciclo de vida das válvulas de exaustão.

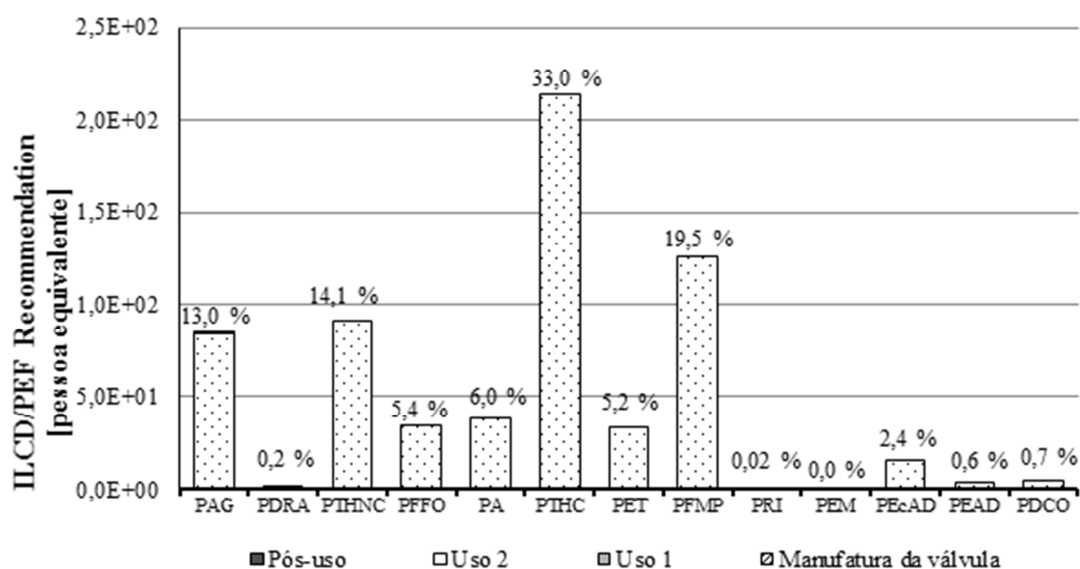


Fig. 5. Resultados do AICV para o estudo de caso.

Os resultados da Figura 5 apontam que 79,6% dos impactos no ciclo de vida das válvulas ocorrem nas categorias PAG, PTHNC, PTHC e PFMP. Para todas as categorias avaliadas, os impactos se mostraram fundamentalmente relacionados ao uso 2 do produto. Os principais *hotspots* ambientais do uso 2 para PAG, PTHNC, PTHC e PFMP foram as emissões ao ar de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂), material particulado, e metais pesados, e as emissões a água de metais pesados, todos devido a cadeia de produção da gasolina e/ou de sua queima no motor de veículo de passeio. Os impactos do uso 2 foram expressivos por conta da grande demanda de gasolina (1,7E+04 kg) no sistema de produto, uma vez que vida útil das válvulas foi estimada em 300.000 km rodados.

Em relação à etapa de manufatura das válvulas automotivas, ainda que seus impactos relativamente ao ciclo de vida do produto não tenham sido expressivos, na Figura 6 são apresentados os impactos potenciais para cada um de seus processos elementares. A Figura 6 destaca que os processos elementares com maior contribuição nos impactos foram o processamento da cabeça, processamento de tarugos, e o processamento da haste das válvulas. Os *hotspots* ambientais para esses três processos foram principalmente o consumo de eletricidade para a categoria PDRA, seguido do consumo das matérias primas Inconel 751 e Silchrome 1, e o consumo de fluido de corte. Esses impactos da etapa de manufatura foram indiretos, pois estiveram relacionados às cadeias de produção das matérias primas e insumos empregados na fabricação das válvulas. As emissões diretas da manufatura (e.g., lubrificantes usados, resíduos sólidos) não contribuíram significativamente para os impactos potenciais avaliados.

Os resultados deste estudo de caso corroboram com outros estudos prévios da literatura. Por exemplo, Warsen e Krinke (2012) mostraram que o consumo de combustível na fase de uso de veículos é afetado principalmente pelo peso do mesmo, especialmente para categorias de impacto como PAG. Já este estudo também mostrou que os impactos do ciclo de vida das válvulas automotivas são fundamentalmente devido ao uso 2, i.e., estão associados ao uso das válvulas durante a fase de uso do motor de veículo, não apenas para a categoria de PAG, mas também para outras categorias envolvendo impactos ambientais toxicológicos e não toxicológicos. O tipo do material empregado na produção do automóvel também pode influenciar significativamente nos impactos potenciais durante a fase de uso, visto que diferentes materiais podem apresentar diferentes densidades, e por conseguinte, diferentes pesos na montagem do veículo como um todo (WARSEN; KRINKE, 2012). Neste artigo, não foi avaliada a influência dos demais componentes de veículo além da válvula de escape.

Mediante os resultados do estudo, a Tabela 3 mostra uma síntese dos principais *hotspots* ambientais e sugestões de melhorias para redução dos mesmos rumo à uma produção mais sustentável na indústria de válvulas automotivas.

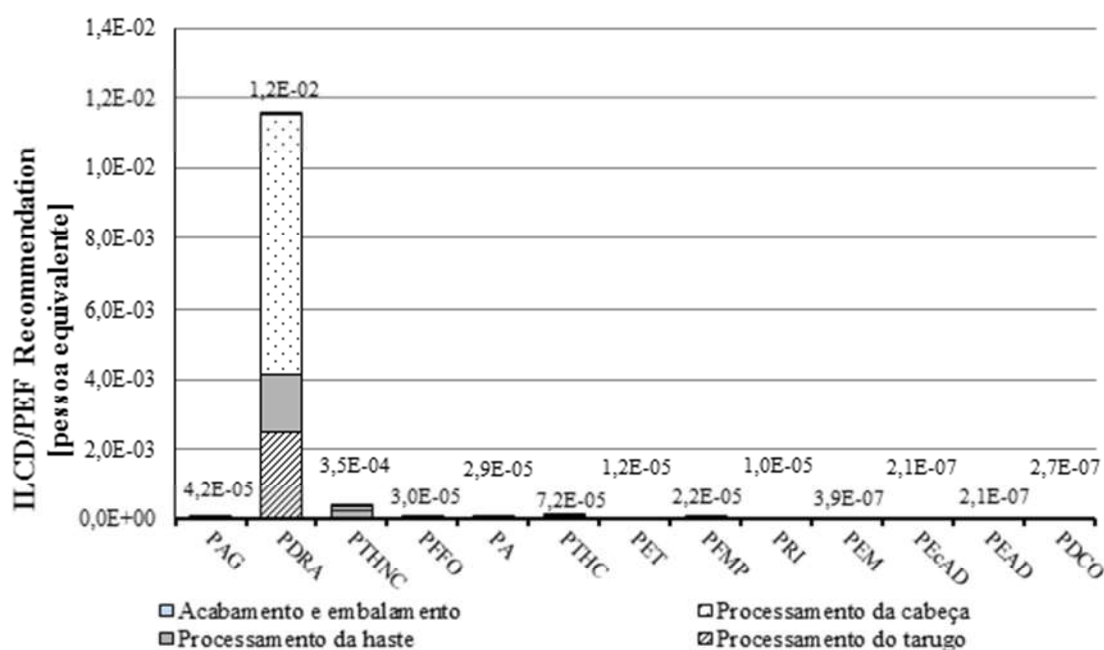


Fig. 6. Resultados da AICV por processo elementar da etapa de manufatura das válvulas automotivas.

Tabela 3: Síntese dos principais *hotspots* e oportunidades de melhoria para o ciclo de vida do produto.

Processo elementar	Categorias de impacto ambiental de destaque	Hotspots ambientais	Oportunidades de melhorias
Uso 2	PAG	Emissões ao ar de CO, CO ₂ , SO ₂ , material particulado, e metais pesados, e as emissões a água de metais pesados, devido a cadeia de produção da gasolina e/ou de sua queima no motor de veículo de passeio.	Reduzir o consumo de combustível durante a fase de uso. O consumo de combustível depende de diversos fatores, entre eles, o peso do veículo. Assim, estudos de Ecodesign podem ser realizados com foco na redução do peso dos componentes que integram os
	PTHNC		
	PTHC		
	PFMP		

			veículos.
Processamento da cabeça	PDRA	Consumo de eletricidade, seguido do consumo das matérias primas Inconel 751 e Silchrome 1, e o consumo de fluido de corte.	Reduzir o consumo de matérias-primas e insumos na produção. Iniciativas como a PE integrada à P+L ou a GM, podem ser alternativas viáveis para se minimizar desperdícios na produção, com viés de preservação do meio ambiente.
Processamento do tarugo			
Processamento da haste			

4. Considerações Finais

A ACV na indústria automotiva se mostra um importante técnica para subsidiar uma produção mais sustentável. Neste artigo, para o estudo de caso na indústria automotiva de válvulas, as principais categorias de impacto avaliadas foram PAG, PFMP, PTHC e PTHNC. Mais de 90% dos impactos avaliados foram à jusante da manufatura, i.e., ocorreram durante a fase de uso das válvulas em motores de veículos. Portanto, os impactos da etapa de manufatura das válvulas foram pouco significativos frente à representatividade da fase de uso do produto. Assim, reduzir o consumo de combustível durante a fase de uso é uma iniciativa importante para minimizar *hotspots* ambientais. O consumo de combustível depende de diversos fatores, entre eles, o peso do veículo. Assim, estudos de Ecodesign podem ser realizados com foco na redução do peso dos componentes que integram os veículos. Contudo, como as válvulas automotivas são elementos de pequenas dimensões e peso frente a um automóvel convencional, tais medidas de redução de peso devem focar em outros elementos de maior porte e representatividade mássica nos automóveis (como chassis, e outras partes estruturais). Sobre os impactos potenciais da fase de fabricação das válvulas, a principal categoria de impacto afetada foi PDRA, em virtude do consumo de eletricidade, seguido do consumo das matérias primas Inconel 751 e Silchrome 1, e o consumo de fluido de corte nas etapas de fabricação. Portanto, sugere-se a minimização do consumo desses recursos, e iniciativas como a PE integrada à P+L ou a GM são desejáveis, pois elas possibilitam gerar soluções com foco na redução de desperdícios na produção, rumo a preservação do meio ambiente.

5. Referências Bibliográficas

- DAVIDSON, A. J.; BINKS, S. P.; GEDIGA, J. Lead industry life cycle studies: environmental impact and life cycle assessment of lead battery and architectural sheet production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 21, n. 11, p. 1624-1636, 2016.
- DELOGU et al. Environmental and economic life cycle. assessment of a lightweight solution for an automotive component: A comparison between talc-filled and hollow glass microspheres-reinforced polymer composites. *Journal of Cleaner Production*, v. 139, p. 548-560, 2016.
- DORNFELD, D. A. Moving towards green and sustainable manufacturing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, v.1, n.1, p. 63-66, 2014.
- DORNFELD, D.A. et al. Introduction to green manufacturing. In: DORNFELD, D.A. *Green manufacturing: fundamentals and applications*. Berkeley: Springer, 2013.
- DUFLOU, J.R.; KELLENS, K.; DEWULF, W. Unit process impact assessment for discrete part manufacturing: a state of the art. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v.4, n.2, p.129-135, 2011.
- EC/JRC/IES. International reference life cycle data system (ILCD) handbook: framework and requirements for LCIA models and indicators. Luxembourg: European Commission. Joint Research Council. Institute for Environment and Sustainability, 2010.

FILLETI, R.A.P. Modelo dinâmico de inventário de ciclo de vida (ICV) de processo unitário discreto de manufatura: um estudo de caso com retificação cilíndrica externa. 2015. 130f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

JESWIET, J.; KARA, S. Carbon emissions and CESTM in manufacturing. CIRP Annals - manufacturing technology, v.57, n.1, p.17–20, 2008.

KELLENS, K. et al. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)—CO2PE! Initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: methodology description. The International Journal of Life Cycle Assessment, v.17, n.1, p.69–78, 2012a.

_____. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) CO2PE! Initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 2: case studies. The International Journal of Life Cycle Assessment, v.17, n.2, p.242–251, 2012b.

LINKE, B.; HUANG, Y.-C.; DORNFELD, D. Establishing greener products and manufacturing processes. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, v.13, n.7, p.1029–1036, 2012.

LIKER, J. K. O modelo Toyota: 14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo. Porto Alegre: Bookman, 2005.

MILLER, G.; PAWLOSKI, J.; STANDRIDGE, C. A case study of lean, sustainable manufacturing. Journal of Industrial Engineering and Management, v. 3, n. 1, p. 11-32, 2010.

NAKANO, K.; SHIBAHARA, N. Comparative assessment on greenhouse gas emissions of end-of-life vehicles recycling methods. Journal of Material Cycles and Waste Management, v. 19, n. 1, p.505-515, 2017.

OLIVEIRA, J. A. Relação entre as práticas de Produção mais Limpa e as de Produção Enxuta: estudos de casos múltiplos e survey sobre os impactos no desempenho ambiental, econômico e operacional da empresa. 2016. 249 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Produção. Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, J. A. Environmental Management System ISO 14001 factors for promoting the adoption of Cleaner Production practices. Journal of Cleaner Production. v. 133, n. p. 1384–1394, 2016.

PAMPANELLI, A. B.; FOUND, P.; BERNDARDES, A. M. A Lean and Green Kaizen Model. In: 2011 POMS Annual Conference. Reno, Nevada, U.S.A. April 29 to May 2, 2011.

SCHOGL, J. P.; BAUMGARTNER, R. J.; HOFER, D. Comparative assessment on greenhouse gas emissions of end-of-life vehicles recycling methods. Journal of Cleaner Production, v. 139, p. 548-560, 2016.

SONG, L.; LIANG, D. Lean construction implementation and its implication on sustainability: a contractor's case study. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 38, n. 3, p. 350-359, 2011.

SHIN, S.-J. et al. Process-oriented life cycle assessment framework for environmentally conscious manufacturing. Journal of Intelligent Manufacturing, p.1-19, 2015.

SILVA, D. A. L. Gestão do ciclo de vida de produtos por meio da avaliação e do monitoramento ambiental de processos de manufatura: procedimento e estudos de caso. 2016. 317 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Produção. Universidade de São Paulo.

SILVA, D. A. L.; SILVA, E. J.; OMETTO, A. R. Green manufacturing: uma análise da produção científica e de tendências para o futuro. Production, p.642-655, 2016.

- WARSEN, J.; KRINKE, S. The Life cycle approach at Volkswagen. AZT Worldwide, v.114, p.4–9, 2012.
- WOMACK, J. P.; JONES, D. T. A mentalidade enxuta nas empresas. 6. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2004.
- WU, P.; LOW, S. P. Lean Management and Low Carbon Emissions in Precast Concrete Factories in Singapore. Journal of Architectural Engineering, v. 18, n. 2, p. 176-186, 2012.
- ZENDOIA, J. et al. A Specific method for the life cycle inventory of machine tools and its demonstration with two manufacturing case studies. Journal of Cleaner Production, v.78, p.139–151, 2014.
- YIN, R. Estudo de caso: Planejamento e Métodos. (2^a Ed.). Porto Alegre: Bookman. 2001.