

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO FINANCEIRO-AMBIENTAL DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D PELA TECNOLOGIA DE MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO ATRAVÉS DA FERRAMENTA MFCA

Tiago Yuiti Kamiya (UFPR) tiagokamiya@hotmail.com
Marcell Mariano Corrêa Maceno(UFPR) marcell.maceno@gmail.com
Mariana Kleina (UFPR) marianakleina11@gmail.com

Resumo:

A Manufatura Aditiva tem sido amplamente utilizada para fabricação de peças personalizadas e com geometria complexa sem a necessidade de utilização de moldes e com o menor custo envolvido. A tecnologia FDM (*Fused Modeling Deposition*) é um das tecnologias que compõem a Manufatura Aditiva, tendoofilamento termoplástico como sua matéria-prima. Esta tecnologia tem demonstrado grande avanço devido sua acessibilidade e sua produção em pequena escala. Este artigo tem por objetivo realizar a impressão de uma peça com o material PLA (ácido polilático) e realizar seu estudo econômico-ambiental utilizando a ferramenta MFCA (*Material Flow Cost Accounting*). A pesquisa apresentou os custos envolvidos em cada centro de custo, e os materiais responsáveis por tal impacto. Concluiu-se que a MFCA pode ser utilizado na análise econômica de processos FDM, contribuindo para evolução desta tecnologia.

Palavras-chave: FDM, PLA, MFCA, manufatura aditiva.

EVALUATION OF FINANCIAL AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF THE 3D PRINTING PROCESS BY MODELING TECHNOLOGY BY FUSION AND DEPOSITION THROUGH THE MFCA TOOL

Abstract

Additive Manufacturing has been widely used to manufacture custom parts and with complex geometry without the need for molds and at the lowest cost involved. FDM (*Fused Modeling Deposition*) technology is one of the technologies that make up Additive Manufacturing, with thermoplastic filaments as its raw material. This technology has shown great advancement due to its accessibility and its small scale production. The objective of this paper is to perform a one-piece impression with PLA (polylactic acid) material and perform its economic study using the MFCA (*Material Flow Costs Accounting*) tool. The research presented the costs involved in each cost center, and the materials responsible for such impact. It was concluded that the MFCA can be used in the economic analysis of FDM processes, contributing to the evolution of this technology.

Key-words: FDM, PLA, MFCA, additive manufacturing.

1. Introdução

A Manufatura Aditiva comumente conhecida como Impressão 3D, da sigla em inglês AM (*Additive Manufacturing*), criada por Charles Hull em 1986, permite a produção de uma diversidade de peças através da deposição de uma camada sobre a camada anterior (NGO *et al.*, 2018). A ASTM (2012) define a Manufatura Aditiva como um processo em que produtos são criados a partir de um modelo 3D, e pela deposição de material camada após camada, em oposição a manufatura de subtração (processo em que o material é retirado da peça). Também define sinônimos que podem ser utilizados para tal tecnologia: fabricação aditiva, processo aditivo, técnicas aditivas, manufatura de adição de camada, manufatura de camada e fabricação de forma livre. A Manufatura Aditiva pode ser dividida quanto a sua base utilizada, sendo estas a base em pó, base líquida e base sólida (WONG e HERNANDEZ, 2012).

A tecnologia FDM tem sua utilização caracterizada pela base líquida, em que seu processo consiste na fabricação de uma peça a partir da extrusão de um filamento termoplástico (MOHAMED *et al.*, 2017). Esta tecnologia tem se destacado devido a características de precisão dimensional, fácil utilização e integração com diferentes softwares (BOPARAI *et al.*, 2016). O número de fabricantes que produziram e venderam sistemas de manufatura aditiva passou de 49 empresas em 2014 para 97 empresas em 2016 demonstrando o crescimento de 17,4 % em receita mundial no ano de 2016 (KIANIAN, 2017).

As peças produzidas por tal tecnologia podem ser caracterizadas quanto aos seus aspectos técnicos e financeiro-ambientais. O aspecto técnico refere-se a dados como resistência a tração, flexão, precisão dimensional, enquanto os aspectos econômicos são referentes ao tempo de fabricação, quantidade de suporte utilizado na impressão e os materiais utilizados (GÓRSK *et al.*, 2013). Neste contexto de aspectos financeiro-ambientais, a MFCA (*Material Flow Cost Accounting*) é um método que detecta o desperdício gerado com a perda de materiais, além de identificar os custos de um processo produtivo fracionado em centros de custos, possibilitando a avaliação de desempenho financeiro e ambiental (SCHMIDT, 2015). A busca pelo uso sustentável de recursos é impulsionada pela escassez de recursos, conscientização ambiental e redução de custo, sendo assim a MFCA torna-se apropriado para solucionar estas questões (WANG *et al.*, 2017).

Nesta pesquisa foi utilizado a ferramenta MFCA a partir da impressão de uma peça em PLA pela tecnologia de Modelagem por Fusão e Deposição com o objetivo de avaliar o desempenho ambiental das etapas deste processo de impressão.

2. Revisão da literatura

2.1 Material Flow Cost Accounting

A MFCA é uma ferramenta que permite as empresas detectarem o valor adicional desperdiçado com a perda de materiais. Pode ser caracterizado como um método que distribui as despesas de um processo produtivo para seus produtos e respectivas perdas de materiais (SCHMIDT, 2015). A NBR ISO 14051 (2013) define a MFCA como uma ferramenta de gerenciamento que pode ajudar as organizações a entender potenciais danos ambientais e financeiros pelo uso de material e energia. A MFCA também é caracterizada por quantificar e

avaliar potenciais economias, sendo expressas em condições monetárias, sendo que o método não demonstra somente os custos diretos de desperdícios (perdas), mas custos de despesa de material, de trabalho e capital (SCHMIDT *et al.*, 2013).

Kasemset (2015) descreve que durante o processo de MFCA, material, energia e custos do sistema são analisados e classificados como custos positivos e negativos. Dessa forma os custos negativos podem ser identificados e melhorias serem implementadas para seu tratamento. Os resultados obtidos por tal melhoria podem ser facilmente entendidos pelos gestores responsáveis pelo processo. Neste contexto a NBR ISO 14051 (2013) define como objetivo da MFCA aumentar a transparência do fluxo de materiais e uso de energia, apoiar as decisões organizacionais e melhorar a coordenação e comunicação sobre o uso de material e energia dentro de uma organização.

Jasch (2008) considerou 3 tipos de características em seu estudo, sendo elas a matéria-prima, materiais auxiliares e materiais operacionais. As matérias-prima eram definidas como a fonte principal do produto final, os materiais auxiliares eram acrescentados às matérias-prima durante o processo, e os materiais operacionais eram os materiais indispensáveis para a realização do processo, por exemplo: água utilizada para o resfriamento das máquinas. O procedimento para criação de uma MFCA pode ser definido como a modelagem do fluxo de processo, quantificação dos fluxos em unidades físicas e a avaliação monetária do fluxo (SYGULLA *et al.*, 2011)

O primeiro passo inicia-se com a construção do modelo do fluxo do processo, em que é visualizado sua fronteira, seus centros de custos, e os fluxos de material e energia. No segundo passo as quantidades de fluxos de material e energia são quantificadas em unidades físicas, e no terceiro passo é avaliado monetariamente o fluxo do sistema. Jakrawatanaet *al.* (2016) definem como perda de material na produção o uso não produtivo ou eficiente de material extraído da natureza. O princípio do balanço de massa é utilizado para quantificar o fluxo e estoque de material, que inclui as matérias-prima, peças e componentes do processo de manufatura. Dessa forma, partes de matérias-prima tornam-se resíduos, peças defeituosas, e emissões de gás associados a transformação de material, e que são identificados como perda de material. Jakrawatanaet *al.* (2016) realizaram um estudo da MFCA para identificar os custos de material e energia perdidos, assim como para melhoria da produtividade na produção de *starch* e etanol na Tailândia.

Tajelawie e Garbharran (2015) realizaram uma revisão dos princípios e aplicações comparando 3 ferramentas: *Activity-Based Costing* (ABC), *Life-CycleAssesment* (LCA) e *Material Flow Cost Accounting* (MFCA). O resultado revelou que a MFCA possui uma vantagem ao oferecer maiores informações detalhadas, relacionada a características físicas e monetárias. Além disso, caracteriza a MFCA como uma técnica viável para identificar e reduzir o desperdício em processos produtivos, além de auxiliar numa decisão por parte de gestores e outras partes interessadas.

Wanget *al.* (2017) realizaram um estudo no qual estabeleceu vários modelos de cálculos ao longo do processo produtivo para detectar o fluxo de resíduos. As perdas anteriormente ignoradas foram identificadas e motivaram a realização de análises de custo-benefício, assim como melhoraram a eficiência dos recursos e fornecimento de suporte para tomada de decisões na fabricação de PCB (*PrintedCircuitBoard*).

2.2 Ferramenta MFCA

A NBR ISO 14051 (2013) define a MFCA como uma ferramenta de gerenciamento que pode ajudar e compreender as potenciais consequências financeiras a partir do uso de material e energia. A norma descreve as atividades que compõem o estudo de MFCA, estas descritas do item 2.3 a 2.9.

2.3 Especificação das fronteiras e intervalo de tempo

A especificação de fronteiras é definida como a abrangência do estudo, e pode ser definida como um processo, múltiplos processos, cadeia de suprimentos ou toda uma instalação. A partir da definição das fronteiras, o período de tempo é definido pelo intervalo para a coleta de dados, dependendo do processo analisado e da confiabilidade na utilização dos mesmos. Este tempo é caracterizado como a unidade funcional da MFCA e, para sua definição, devem ser consideradas possíveis sazonalidades de processos, bem como a existência de processos em batelada.

2.4 Determinação da quantidade de centros de custos

Os centros de custos podem ser definidos a partir de informações do processo e registros. Caso seja necessário podem ser definidos centros de custo adicionais ao ser detectado algum fluxo de interesse na análise.

2.5 Identificação das entradas e saídas para cada centro de custo

A partir da definição dos centros de custos, os *inputs* e *outputs* são definidos, suas possíveis entradas são materiais, energia e mão-de-obra, e as saídas de materiais em produtos e resíduos, energia agregada a produto e perdida com resíduo, perda de energia e perda de material.

2.6 Quantificação dos fluxos de materiais em unidades físicas

As entradas e saídas definidas para o centro de custo podem ser quantificadas em unidades físicas, tais como massa, comprimento, volume, energia, nº de funcionários, tempo de atividade, potência de equipamento, dentre outras, dependendo dos tipos de materiais e processos estudados. Caso existam informações consideradas de baixa significância, estas podem ser omitidas à critério da organização.

2.7 Quantificação dos fluxos de materiais em unidades monetárias

A quantificação dos fluxos de materiais em unidades monetárias é definida a partir da definição dos custos de materiais, energia, mão-de-obra e gestão de resíduos. Para a

monetização dos fluxos nos centros de custos, são utilizados os custos unitários de aquisição material, de energia, de hora-homem trabalhada, da gestão do resíduo, bem como os valores já levantados na etapa 2.6. Além disso, para os cálculos dos custos de energia e de mão-de-obra são utilizados direcionadores de massa alocada em produto ou resíduo. Podem ainda ser considerados os custos de depreciação e de manutenção de maquinários, e de transporte.

2.8 Resumo e interpretação de dados da MFCA

O resumo e interpretação dos dados da MFCA permite a identificação dos centros de custo que possuem as perdas mais significativas, ou seja, aqueles com pior desempenho financeiro-ambiental. Estes centros podem ser analisados em detalhes para identificar causas de perdas de materiais e os fatores que influenciaram para isso.

2.9 Identificação e avaliação de oportunidades de melhoria

A partir dos resultados gerados por uma MFCA, é possível analisar a complexidade, consequências e causas do uso e perda de materiais e energia, afim de procurar oportunidades para melhorar seu desempenho ambiental, além de apoiar uma análise de custo-benefício das propostas independente do investimento necessário para sua realização.

3. Método

Para a realização deste estudo, foi aplicada a ferramenta MFCA em um processo de impressão 3D com tecnologia FDM e uso de filamento de PLA, para avaliação de desempenho financeiro-ambiental deste processo. As atividades realizadas para o desenvolvimento deste estudo seguem itens 3.1 à 3.5.

3.1 Especificação das fronteiras e intervalo de tempo

O sistema analisado foi o processo de impressão 3D de uma peça por tecnologia de modelagem de fusão e deposição. Para isso, as atividades definidas foram: inserção do modelo da peça na impressora, o pré-aquecimento da impressora e sua posterior finalização. A unidade funcional foi definida como 1 peça de PLA.

3.2 Determinação da quantidade de centros de custos

Os centros de custos foram definidos como aquisição de material, pré-aquecimento e impressão da peça.

3.3 Identificação das entradas e saídas para cada centro de custo

As entradas e saídas para cada centro de custo foram definidas de acordo com a Figura 01:

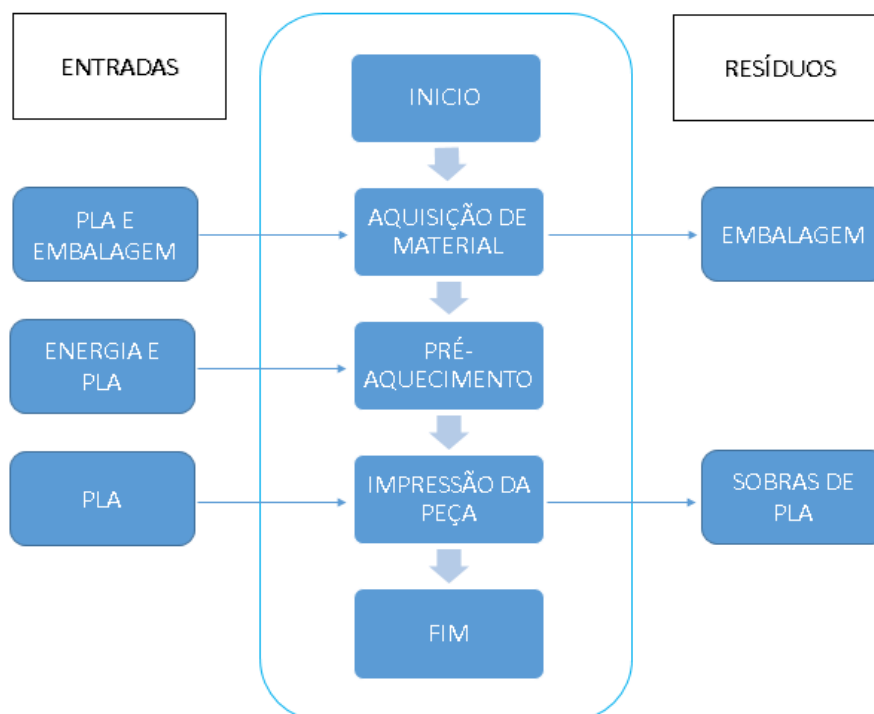


Figura 1 – Definição das entradas e saídas de cada centro de custo

Fonte: Os Autores (2018)

3.4 Quantificação dos fluxos de materiais em unidades físicas e de fluxos monetários

A quantificação dos materiais foi definida como a unidade de medida em g (gramas), e seu custo unitário como R\$/g. A energia consumida foi obtida pela energia utilizada no processo em kW.h e o custo unitário de energia como R\$/kW.h. A mão-de-obra foi determinada como quantidade de funcionários (unidade), custo unitário de mão-de-obra R\$/hora e a quantidade de horas trabalhadas (hora). Neste estudo não foram considerados os custos de depreciação e manutenção, devido o valor da unidade funcional ser bastante reduzido, tornando não significativo esses itens de quantificação. A partir destes dados, houve a quantificação dos fluxos dos materiais em unidades monetárias.

3.5 Análise dos resultados

Através dos resultados dos fluxos monetários agregados a produtos e resíduos em cada centro de custo, foi possível identificar o centro de custo com maior custo em desperdício, e também analisar as reais causas destas perdas, através da análise das informações de material, energia e mão-de-obra.

Com estas análises, tornou-se possível avaliar possibilidades de melhoria do processo, de modo a torná-lo mais eficiente em relação ao seu desempenho financeiro-ambiental.

4. Resultados e discussão

A partir da definição dos centros de custos, suas respectivas entradas e saídas e os resíduos gerados no processo, a Tabela 1 foi construída, com a quantidade de mão-de-obra utilizada e o tempo de cada processo.

PROCESSO	QUANTIDADE DE PESSOAS NO PROCESSO	TEMPO DO PROCESSO
AQUISIÇÃO DE MATERIAL	1	X
PRÉ-AQUECIMENTO	1	2 min
IMPRESSÃO DA PEÇA	1	48 min

Fonte: Os Autores (2018)

Tabela 1: Informações para cada centro de custo

A Tabela 2 define as a quantificação das entradas e saídas de cada centro de custo.

PROCESSO	ENTRADA DE MATERIAL	SAÍDA DE MATERIAL	RESÍDUO
AQUISIÇÃO DE MATERIAL	PLA E EMBALAGEM	EMBALAGEM	EMBALAGEM
PRÉ-AQUECIMENTO	ENERGIA e PLA	X	X
IMPRESSÃO DA PEÇA	PLA	PLA	SOBRAS DE PLA

Fonte: Os Autores (2018)

Tabela 2: Entrada e saída dos centros de custo

Os valores dos materiais utilizados foram obtidos a partir do custo de compra conforme a Tabela 3. O PLA demonstrou perda de material por volatilidade, quando comparado ao total de filamento inicial. Os custos de resíduos também são demonstrados nesta tabela.

		AQUISIÇÃO DE MATERIAL			PRÉ-AQUECIMENTO			IMPRESSÃO DA PEÇA		
		Preço (R\$/g)	Quantidade (g)	Total (R\$)	Preço (R\$/g)	Quantidade (g)	Total (R\$)	Preço (R\$/g)	Quantidade (g)	Total (R\$)
MATERIAL	PLA	0,105	1000	105	X	X	X	0,105	9,3	0,9765
	EMBALAGEM	X	X	X	X	X	X	X	X	X
RESÍDUO	SOBRA DE PLA	X	X	X	X	X	X	0,105	0,17	0,01785
	VOLATILIDADE	X	X	X	X	X	X	0,105	0,6838	0,071799

Fonte: Os Autores (2018)

Tabela 3: Custos de material

O custo de mão-de-obra para a realização desta impressão foi definido como R\$ 20,00 por hora de impressão. A impressão desta peça teve a duração de 48 minutos acrescidos de 2 minutos do pré-aquecimento da impressora 3D. A energia gasta levou em consideração o tempo e a potência da impressora (40W), para o cálculo de kWh. O custo unitário definido do kWh foi de R\$ 0,77 já inclusos os impostos de ICMS e PIS/COFINS, baseado na tarifa da COPEL para residências. A Tabela 4 apresenta os gastos referentes aos custos de energia e da

gestão de resíduos, sendo que esta última não apresentou custos, pois as sobras de material são estocadas para futuros estudos de remanufatura e reutilização deste material.

	CUSTO UNITÁRIO (R\$)	AQUISIÇÃO DE MATERIAL	PRÉ-AQUECIMENTO	IMPRESSÃO DA PEÇA
CUSTO SDE	0,76897	X	0,000999661	0,02460704
ENERGIA		X	0,000999661	0,02460704
PRODUTO		X	X	X
RESÍDUO		X	0,6666667	16
CUSTO DO SISTEMA	20	X	0,6666667	16
PRODUTO		X	X	X
RESÍDUO		X	X	X
CUSTO GESTÃO DE	X	X	X	X
RESÍDUO				

Fonte: Os Autores (2018)

Tabela 4: Custos do sistema

A Tabela 5 apresenta os custos totais envolvidos em relação aos resíduos em cada centro de custo. O centro de custo Aquisição de material apresentou maior custo, sendo este pela embalagem, que teve um custo de R\$ 0,47, seguido das sobras de PLA e volatilidade no centro de custo de impressão da peça. O custo poderia ser reduzido ao não adquirir a embalagem na aquisição do material, e somente realizar a troca do filamento, assim como estudar a possibilidade de reduzir a quantidade de material que se torna sobras na impressão.

		AQUISIÇÃO DE MATERIAL	PRÉ-AQUECIMENTO	IMPRESSÃO DA PEÇA
RESÍDUO (PERDA DE MATERIAL) (R\$)	SOBRA DE PLA	X	X	0,01785
	VOLATILIDADE	X	X	0,07179
	EMBALAGEM	0,47	X	X
CUSTO DE ENERGIA		X	X	X
RESÍDUO (R\$)				
CUSTO DO SISTEMA		X	X	X
RESÍDUO (R\$)				
CUSTO DA GESTÃO		X	X	X
DE RESÍDUO (R\$)				
TOTAL (R\$)		0,47	X	0,08964

Fonte: Os Autores (2018)

Tabela 5: Custo total dos resíduos

5. Conclusão

A partir da elaboração do fluxo de produção de uma peça pela impressora 3D e utilizando a ferramenta MFCA, foi possível desdobrar os custos envolvidos em cada etapa de sua produção. Foi possível observar que o custo de mão-de-obra tem alto impacto em custos, por ser necessário um conhecimento em parâmetros e configurações da impressora 3D. A volatilidade do material é responsável por 7% da perda de massa, neste caso em comparação aos 9,3 g de filamento utilizado.

Para estudos futuros, pode-se definir a não aquisição de embalagens, obtendo somente o material (filamento termoplástico), a partir colocação do filamento no carretel já adquirido, assim como o estudo da impressão de peças com maior massa, para se observar a perda de material existente pela volatilidade, e a inclusão dos custos de gestão de resíduos, sendo o reprocessamento uma alternativa às sobras geradas pela impressão. Nesta mesma impressora, realizar o estudo de outros materiais, tais como PETG, PLA flexível, visando o estudo de volatilidade existente nestes materiais, e a possível redução desta perda de massa.

6. Agradecimentos

Os agradecimentos são para o PPGE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Paraná e a CAPES pela bolsa de pesquisa cedida no ano de 2017

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14051.** Gestão Ambiental, Contabilidade dos custos de fluxos de material. Rio de Janeiro, 2013.
- ASTM COMMITTEE F42 ON ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES. SUBCOMMITTEE F42. 91 ON TERMINOLOGY.** Standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM International, 2012.
- BOPARAI, K. S.; SINGH, R.; SINGH, H.** *Development of rapid tooling using fused deposition modeling: a review.* Rapid Prototyping Journal, v. 22, n. 2, p. 281-299, 2016.
- GÓRSKI, F.; KUCZKO, W.; WICHNIAREK, R.** *Influence of process parameters on dimensional accuracy of parts manufactured using Fused Deposition Modelling technology.* Advances in Science and Technology Research Journal, v. 7, n. 19, p. 27--35, 2013.
- JAKRAWATANA, N.; PINGMUANGLEKA, P.; GHEEWALA, Shabbir H.** *Material flow management and cleaner production of cassava processing for future food, feed and fuel in Thailand.* Journal of Cleaner Production, v. 134, p. 633-641, 2016.
- JASCH, C. M.** *Environmental and material flow cost accounting: principles and procedures.* Springer Science & Business Media, 2008.
- KASEMSET, C.; CHERNSUPORNCHAI, J.; PALA-UD, W.** *Application of MFCA in waste reduction: case study on a small textile factory in Thailand.* Journal of Cleaner Production, v. 108, p. 1342-1351, 2015.
- KIANIAN, B.** *Wohlers Report 2017: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report: Chapters titles: The Middle East, and other countries.* 2017.
- MOHAMED, O. A.; MASOOD, S. H.; BHOWMIK, J. L.** *A parametric investigation of the friction performance of PC-ABS parts processed by FDM additive manufacturing process.* Polymers for Advanced Technologies, v. 28, n. 12, p. 1911-1918, 2017.
- NGO, T. D.; KASHANI, A.; IMBALZANO, G.; NGUYEN, K. T.; HUI, D.** *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges.* Composites Part B: Engineering, 2018.
- SCHMIDT, M.; NAKAJIMA, M.** *Material flow cost accounting as an approach to improve resource efficiency in manufacturing companies.* Resources, v. 2, n. 3, p. 358-369, 2013.
- SCHMIDT, M.** *The interpretation and extension of Material Flow Cost Accounting (MFCA) in the context of environmental material flow analysis.* Journal of Cleaner Production, v. 108, p. 1310-1319, 2015.
- SYGULLA, R.; BIERER, A.; GÖTZE, U.** *Material Flow Cost Accounting – Proposals for Improving the Evaluation of Monetary Effects of Resource Saving Process Designs.* In: 44th Conference on Manufacturing Systems. Wisconsin, USA. 2011.
- TAJELAWI, O.; GARBHARRAN, H. L.** *MFCA: an environmental management accounting technique for optimal resource efficiency in production processes.* 2015.
- WANG, Y. X.; KUO, C. H.; SONG, R.; HU, A. H.; ZHANG, S. S.** *Potentials for improvement of resource efficiency in printed circuit board manufacturing: a case study based on material flow cost accounting.* Sustainability, v. 9, n. 6, p. 907, 2017.
- WONG, K. V.; HERNANDEZ, A.** *A review of additive manufacturing.* ISRN Mechanical Engineering, v. 2012, 2012.