



## **AValiação Comparativa Ambiental da Produção de Agregados Naturais e Reciclados para a Construção Civil**

**OCHARÁN, J.S.<sup>1</sup>, LIMA, F. M. S.<sup>1</sup>, LOVÓN, G. C.<sup>1-2</sup>**

<sup>1</sup>Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Departamento de Processos Mineraiis. Cidade Universitária, Rio de Janeiro. e-mail: jsaraviao@poli.ufrj.br ; flima@cetem.gov.br

<sup>2</sup>Universidade Federal do Paraná –UFPR. Departamento de Engenharia de Produção. e-mail: giancarlo.lovon@ufpr.br

### **RESUMO**

A produção de agregados reciclados a partir dos resíduos da construção civil e demolição (RCD) é uma alternativa para substituir os agregados naturais, reduzindo o consumo de recursos mineraiis e diminuindo os resíduos destinados inadequadamente. A demanda pelos agregados reciclados e naturais também vem associada a passivos ambientais consequentes dos processos de produção; portanto, estudos de Avaliação do Ciclo de Vida baseados na norma ISO 14040 são fundamentais para determinar os potenciais impactos ambientais. O objetivo do trabalho é avaliar comparativamente os impactos ambientais associados à produção de agregados naturais e reciclados, através de estudos de caso no município de Jundiaí em São Paulo. O método de avaliação dos impactos ambientais foi o ReCiPe e o *software* para o tratamento dos dados foi o SIMAPRO. Os resultados demonstraram que os maiores impactos nas produções de agregados naturais e reciclados estão associados a Mudanças Climáticas para a Saúde Humana, Mudanças Climáticas para os Ecossistemas e Depleção de Recursos Fósseis. Evidenciou-se também que na produção de agregados reciclados os danos nas categorias de Saúde Humana, Qualidades dos Ecossistemas e Recursos Naturais foram 31%, 31%, 44% superiores que na produção de agregados naturais, devido principalmente ao transporte dos RCD e consumo de diesel.

**PALAVRAS-CHAVE:** Avaliação do Ciclo de Vida, Reciclagem de Resíduos, Mineração Urbana.

### **ABSTRACT**

The recycled aggregates production from construction and demolition waste (CDW) is an option to replacing natural aggregates in order to reduce the consumption of mineral resources and to decrease the amount of waste inadequately destined. The demand for recycled and natural aggregates is also associated with environmental issues resulting from their production; therefore, Life Cycle Assessment studies based on ISO 14040 are fundamental to determine the impacts to the environment. The aim of this work is to evaluate the environmental impacts associated to the production of natural and recycled aggregates through a case study in the municipality of Jundiaí, São Paulo. The evaluating environmental impacts method was ReCiPe and the software for data processing was SIMAPRO. The results showed that the greatest impacts on the production of natural and recycled aggregates are associated with Climate Change for Human Health, Climate Change for Ecosystems and Fossil Resources Depletion. It was also evidenced that into the production of recycled aggregates the damages in the categories of Human Health, Ecosystem Qualities and Natural Resources were 31%, 31%, 44% higher than the production of natural aggregates, due to CDW transport and diesel consumption.

**KEYWORDS:** Life Cycle Assessment, Waste Recycling, Urban Mining.

## 1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é responsável por atender as necessidades de infraestrutura, moradia e desenvolver a economia de diversos países. Porém, consome mais de 40% de matérias-primas e gera aproximadamente 35% dos resíduos sólidos do mundo (ROSADO et al. 2017). No Brasil, a geração de resíduos da construção e demolição (RCD) varia entre 400 e 700 kg/habitante/ano representando quase 50% a 60% de todos os resíduos sólidos gerados nas cidades brasileiras, sendo que aproximadamente 40% dos RCD são reciclados (FRASSON, 2017). O restante é depositado em aterros sanitários ou destinado irregularmente causando a proliferação de vetores, a poluição do solo e das fontes de água e entupimentos de canais de água e esgoto (DELBIANCO, 2018; ABRECON, 2015).

Os RCD também são compostos por uma fração mineral formada principalmente de silicatos ( $\text{SiO}_2$ ), aluminatos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxidos alcalinos (CaO) presentes em concretos, argamassas, cerâmicos, aglomerantes e rochas (ULSEN et al., 2010). Essas bases minerais podem ser re-aproveitadas para fabricação de agregados reciclados na pavimentação de estradas e calçadas, na fabricação de concreto e blocos cerâmicos, na proteção e contenção de taludes, entre outros (GHANBARI et al. 2018; LUZ, ALMEIDA, 2012).

Preocupações ambientais nas últimas décadas têm aprofundado estudos sobre a aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) em diversos produtos do setor da construção civil contemplando a extração de recursos de origem mineral, passando pela fabricação de matérias-primas e insumos, elaboração de produtos intermediários, construção, uso, demolição e destinação final dos RCD (ROSADO et al., 2017; BLENGINI et al., 2012; MARINKOVIC et al., 2010). Yazdanbakhsh et al. (2018) usaram a ACV para avaliar a reciclagem dos RCD na produção de concreto, em Estados Unidos, determinando que a substituição de agregados reciclados por agregados naturais não afeta significativamente os impactos ambientais. Hossain et al. (2016) avaliaram o ciclo de vida da produção de agregados naturais e reciclados, no Japão, demonstrando que agregados reciclados reduzem as emissões de efeito estufa e geram uma economia no consumo de energia renovável. Mercante et al. (2012) aplicaram a metodologia de avaliação na gestão dos RCD, na Espanha, evidenciando que as etapas de transporte, triagem e disposição final contribuem significativamente com impactos ambientais das instalações de tratamento.

Diante da necessidade de evidenciar os impactos dos diversos produtos usados na construção civil, o objetivo do presente trabalho é avaliar comparativamente os impactos ambientais associados à produção de agregados naturais e reciclados, através de estudos de caso no município de Jundiaí em São Paulo.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Com o propósito de determinar os impactos ao meio ambiente dos processos de produção dos agregados naturais e reciclados, foi usada a metodologia da ACV embasada na norma ISO 14040 (ABNT, 2009). Essa metodologia permite identificar e medir os impactos ambientais de um produto, serviço ou organização, sendo dividida em 04 etapas básicas: 1) definir o objetivo e o escopo; 2) analisar o inventário do ciclo de vida; 3) avaliar os impactos ambientais no ciclo de vida; e 4) interpretações nas três etapas anteriores (ABNT, 2009).

## 2.1 Escopo da ACV

O objetivo da ACV foi realizar uma avaliação comparativa dos impactos ambientais da produção de agregados naturais *versus* os agregados reciclados. As unidades funcionais comparativas foram produção de 01 tonelada de agregado natural e 01 tonelada de agregado reciclado. A Figura 1 mostra as operações de produção dos agregados naturais e reciclados para o setor da construção civil e as fronteiras consideradas no presente trabalho.

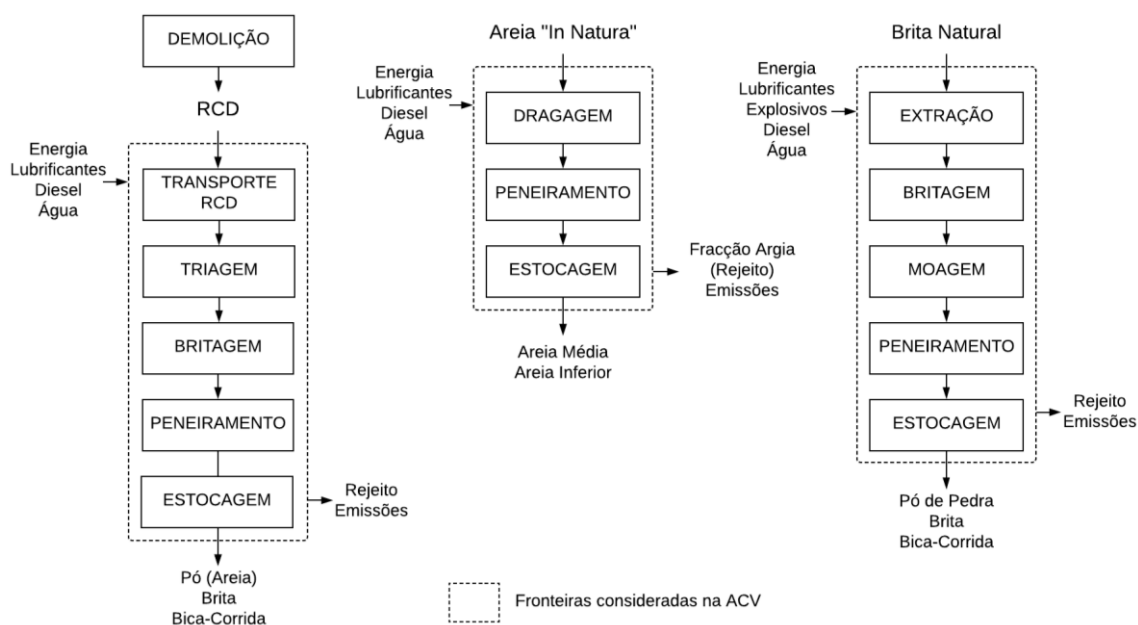


Figura 1. Produção de agregados naturais e reciclados e fronteiras consideradas no estudo de ACV.

Os dados primários da extração de areia foram coletados da Companhia Itabras Mineração LTDA e da produção de agregados reciclados foram da Companhia Soluções em Beneficiamento e Comércio de Resíduos Sólidos LTDA, ambas as localizadas no município de Jundiá. Na produção de brita os dados foram tomados a partir do estudo de Rosado et al. (2017) por terem trabalhado no município de Limeira em São Paulo.

A Companhia Soluções em Beneficiamento e Comércio de Resíduos Sólidos LTDA recebe RCD contendo aproximadamente 20% de materiais indesejáveis como plásticos, madeira, ferro, gesso, etc. que são descartados na etapa de triagem. Posteriormente o RCD limpo é britado e peneirado para finalmente ser classificado em Pó-Areia, Brita 0, Brita 1, Brita 2, Brita 3 e Bica-Corrida.

A Companhia Itabras Mineração LTDA extrai areia no leito do rio Jundiá e da escavação do solo na beira do rio. As operações se iniciam com a dragagem da areia que posteriormente é encaminhada para as peneiras donde é finalmente classificada e estocada em areia média e em areia inferior com frações menores de argila.

Com base em Rosado et al. (2017), a produção de brita começa com extração do minério passando por operações de britagem, moagem, peneiramento e estocagem do Pó de Pedra, Brita 0, Brita 1 e Bica-Corrida.

Na fase de avaliação ambiental realizou-se um cenário comparativo da produção de agregados naturais *versus* os agregados reciclados. Na produção de agregados naturais foi considerada uma mistura de 20% de areia de rio e 80% de brita natural e não foi

contemplado o transporte interno das operações. Na produção de agregados reciclados foi incluído o transporte dos RCD até a usina de reciclagem tomando uma distância média de 10 km.

## 2.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

O ICV envolve o recolhimento de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas de um sistema de produto segundo as fronteiras de estudo (MARINKOVIC et al., 2010). Os dados primários e secundários coletados foram referentes às matérias-primas, insumos, eletricidade, combustíveis, lubrificantes, água, produtos finais e resíduos sólidos da produção de agregados de acordo com cada unidade funcional. As emissões foram calculadas através da base de dados Ecoinvent v.3.0.

## 2.3 Método de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

A metodologia de avaliação dos dados do ICV foi RECIPE v.1.08 e o *software* usado foi o SIMAPRO. Essa metodologia mostra 17 categorias de impacto ambiental vinculadas a 03 categorias de danos ao meio ambiente, Saúde Humana, Qualidade dos Ecossistemas e Recursos Naturais.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Inventário do Ciclo de Vida

O ICV mostrando os principais fluxos de entrada e saída da produção de agregados naturais e reciclados é apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1 – Inventário do ciclo de vida para a produção de 01 tonelada de agregados naturais e 01 tonelada de agregados reciclados.**

	<b>Fluxos de Entrada</b>	<b>Unidade</b>	<b>Agregados Naturais</b>	<b>Agregados Reciclados</b>
	Mix (Areia de Rio e Brita Natural)	t	1,065	--
	RCD	t	--	1,250
<i>Matéria-Prima &amp; Insumos</i>	Explosivos	kg	0,116	--
	Eletricidade	kWh	3,384	1,482
	Água	m <sup>3</sup>	0,346	0,800
	Diesel	L	0,337	0,871
	Óleo Lubrificante	L	0,009	0,012
	Distância do Transporte de RCD	km	--	10
		<b>Fluxos de Saída</b>	<b>Unidade</b>	<b>Agregados Naturais</b>
	Agregado Natural	t	1,000	--
<i>Produtos &amp; Co-Produtos &amp; Resíduos</i>	Agregado Reciclado	t	--	1,000
	Fração de Argila	t	0,025	--
	Rejeito - Pedreira	t	0,040	--
	Rejeito - Reciclagem	t	--	0,250

**Tabela 1 – Inventário do ciclo de vida para a produção de 01 tonelada de agregados naturais e 01 tonelada de agregados reciclados (continuação).**

	Fluxos de Saída	Unidade	Agregados Naturais	Agregados Reciclados
<i>Emissões para o Ar</i>	CO <sub>2</sub>	kg	3,2350	5,1985
	CO	kg	0,0165	0,0161
	CH <sub>4</sub>	kg	0,0095	0,0092
	NO <sub>x</sub>	kg	0,0284	0,0449
	SO <sub>2</sub>	kg	0,0056	0,0065
	NM <sub>VOC</sub>	kg	0,0050	0,0084
	Partículas < 10 um	kg	0,0037	0,0050
	NH <sub>3</sub>	kg	0,0004	0,0001
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> - HFC - CFC	kg	6,22E-07	2,12E-07
<i>Emissões para a Água</i>	Cl	kg	0,0118	0,0173
	SO <sub>x</sub>	kg	0,0023	0,0022
	PO <sub>4</sub>	kg	0,0002	0,0002
	Zn	kg	1,971E-05	4,779E-05
	N	kg	3,03E-05	7,361E-06
	P	kg	1,434E-06	1,182E-06
	B	kg	6,316E-06	6,312E-06
	Cu	kg	3,356E-07	8,367E-07
	Pb	kg	3,428E-07	7,338E-07
<i>Emissões para o Solo</i>	Ca	kg	0,0002	0,0001
	Zn	kg	2,153E-06	1,218E-05
	Pb	kg	1,14E-07	2,30E-07
	Cu	kg	1,988E-07	3,744E-07
	B	kg	5,859E-08	1,056E-07
	Cd	kg	1,768E-08	1,222E-08

Nota-se que os consumos de diesel e água são maiores na produção de agregados reciclados. A utilização de explosivos somente faz referência à extração do minério para produção de brita natural. Observa-se também que as distâncias de transporte afetam unicamente na produção de agregados reciclados, sendo vinculadas com o traslado de RCD. Adicionalmente, de todas as emissões geradas, as dispostas para o ar são as mais significativas, seguidas das emissões para a água e das emissões para o solo.

### 3.2 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

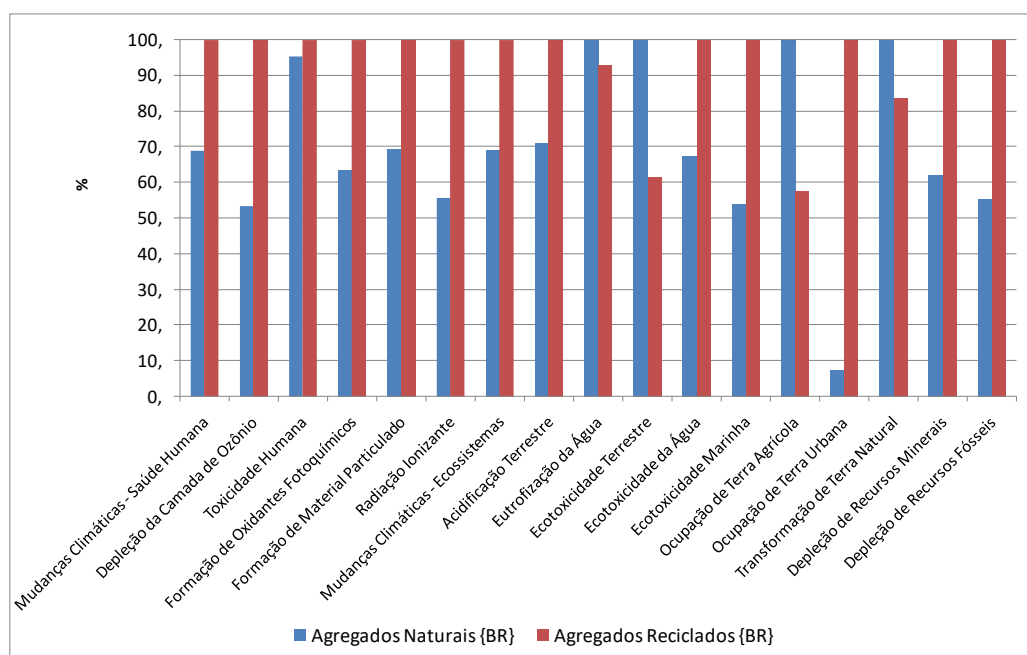
A Tabela 2 apresenta os impactos e as contribuições percentuais dentro das categorias de danos para produzir agregados naturais e reciclados. Nota-se que na produção de agregados naturais, os principais danos à Saúde Humana devem-se às Mudanças Climáticas (63,8%) e à Formação de Material Particulado (35,1%). O dano à Qualidade dos Ecossistemas é causado principalmente pelas Mudanças Climáticas (87,8%) e o dano relacionado ao Consumo de Recursos Naturais é originado especialmente pela Depleção de Recursos Fósseis (94,1%). Observa-se um contexto parecido na produção de agregados reciclados, sendo que os principais danos à Saúde Humana também são devidos às Mudanças Climáticas (64%) e à Formação de Material Particulado (35,1%). O dano à Qualidade dos Ecossistemas é também originado na sua maioria pelas Mudanças Climáticas (88,3%) e o dano referente ao Consumo de Recursos Naturais é causado, sobretudo, pela Depleção de Recursos Fósseis (94,7%).

**Tabela 2 – Resultados da avaliação de impacto do ciclo de vida para produzir 01 tonelada de agregados naturais e 01 tonelada de agregados reciclados.**

Categorias de Danos	Categorias de Impacto	Unidade	Agregado Natural	%	Agregado Reciclado	%
Saúde Humana	Mudanças Climáticas para Saúde Humana	DALY*	5,29E-06	63,76	7,69E-06	64,04
	Depleção da Camada de Ozônio	DALY*	4,94E-10	0,01	9,28E-10	0,01
	Toxicidade Humana	DALY*	8,71E-08	1,05	9,13E-08	0,76
	Formação de Oxidantes Fotoquímicos	DALY*	1,36E-09	0,02	2,15E-09	0,02
	Formação de Material Particulado	DALY*	2,92E-06	35,14	4,22E-06	35,13
	Radiação Ionizante	DALY*	2,62E-09	0,03	4,71E-09	0,04
Qualidade dos Ecossistemas	Mudanças Climáticas para Ecossistemas	espécies. ano	3,00E-08	87,77	4,36E-08	88,30
	Acidificação Terrestre	espécies.ano	1,31E-10	0,38	1,85E-10	0,37
	Eutrofização da Água	espécies.ano	3,12E-12	0,01	2,90E-12	0,01
	Ecotoxicidade Terrestre	espécies.ano	1,78E-10	0,52	1,09E-10	0,22
	Ecotoxicidade da Água	espécies.ano	4,67E-13	0,00	6,93E-13	0,00
	Ecotoxicidade Marinha	espécies.ano	5,10E-13	0,00	9,44E-13	0,00
	Ocupação de Terra Agrícola	espécies.ano	1,98E-09	5,81	1,14E-09	2,30
	Ocupação de Terra Urbana	espécies.ano	2,17E-10	0,64	2,95E-09	5,97
Recursos Naturais	Transformação de Terra Natural	espécies.ano	1,66E-09	4,88	1,39E-09	2,82
	Depleção de Recursos Minerais	\$	0,01034	5,86	0,01667	5,27
	Depleção de Recursos Fósseis	\$	0,16601	94,14	0,29935	94,73

\* DALY: Disability Adjusted Life Years (anos de vida ajustados à incapacidade).

Desde outra perspectiva de análise, a Figura 2 exibe as contribuições percentuais das produções de agregados naturais e agregados reciclados dentro de cada categoria de impacto ambiental.

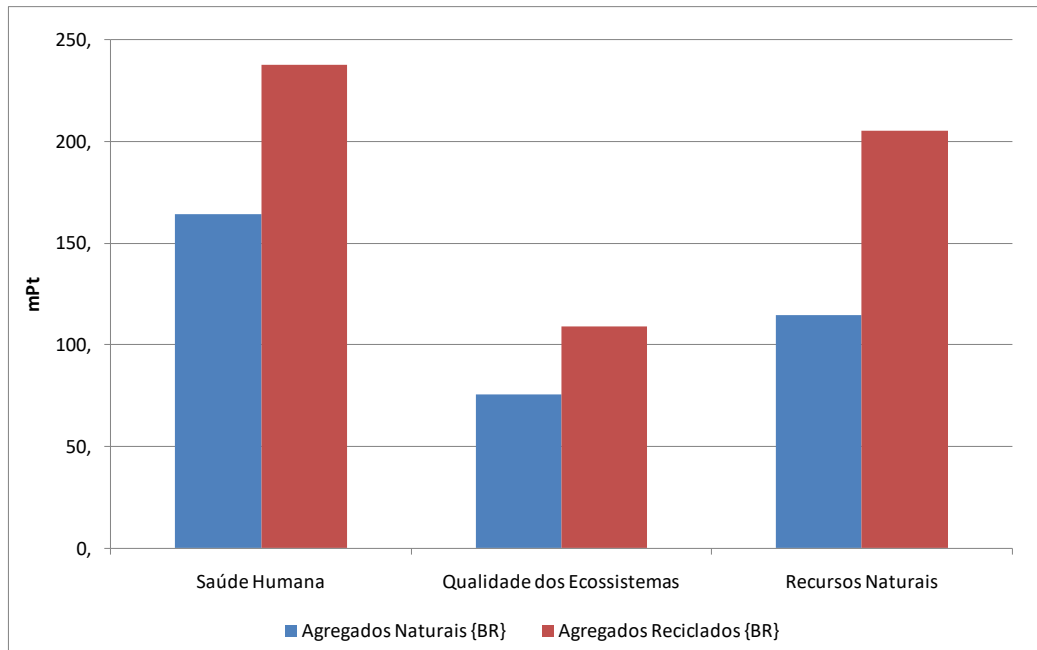


**Figura 2 – Comparação dos impactos ambientais da produção de agregados naturais e reciclados.**

Constata-se que as diferenças percentuais nas Mudanças Climáticas para a Saúde Humana (31,2%), Depleção da Camada de Ozônio (46,7%), Toxicidade Humana (4,6%), Formação de Oxidantes Fotoquímicos (36,5%), Formação de Material Particulado (30,9%), Radiação Ionizante (44,4%), Mudanças Climáticas para Ecossistemas (31,2%), Acidificação Terrestre (29,1%), Ecotoxicidade da Água (32,6%), Ecotoxicidade Marinha (46,0%), Ocupação de Terra Urbana (92,6%), Depleção de Recursos Minerais (38,0%) e Depleção de Recursos

Fósseis (44,5%) indicam que existem maiores impactos ambientais na produção de agregados reciclados que na produção de agregados naturais. Somente as diferenças na Eutrofização da Água (7,2%), Ecotoxicidade Terrestre (38,5%), Ocupação de Terra Agrícola (42,7%) e Transformação de Terra Natural (16,4%) evidenciam que há maiores impactos ambientais na produção de agregados naturais.

Finalmente, considerando uma análise mais abrangente, a Figura 3 evidencia as contribuições, desde uma pontuação única, das produções de agregados naturais e agregados reciclados para cada categoria de danos.



**Figura 3 – Danos ambientais da produção de agregados naturais e reciclados.**

Analisando as categorias de danos desde uma pontuação única destaca-se que a produção de agregados reciclados prejudica mais ao meio ambiente. Nas categorias de Saúde Humana, Qualidades dos Ecossistemas e Recursos Naturais os danos são 30,9%, 30,8%, 44,2% maiores, respectivamente, da produção de agregados reciclados que da produção de agregados naturais. A predominância desses impactos e danos ambientais serem maiores na produção de agregados reciclados radica fundamental pelas quantidades consumidas de combustível durante o transporte e pela distância percorrida desde os pontos de geração até a usina de reciclagem.

#### 4. CONCLUSÕES

O trabalho avaliou comparativamente os ciclos de vida das produções de 01 tonelada de agregados naturais e 01 tonelada de agregados reciclados no município de Jundiaí em São Paulo. Os impactos com maior contribuição às categorias de danos, tanto para ambas as produções de agregados, foram Mudanças Climáticas para a Saúde Humana, Mudanças Climáticas para os Ecossistemas e Depleção de Recursos Fósseis para o Esgotamento dos Recursos Naturais. Os impactos da produção de agregados naturais foram maiores unicamente na Eutrofização da Água, Ecotoxicidade Terrestre, Ocupação de Terra Agrícola e Transformação de Terra Natural. Os impactos da produção de agregados reciclados foram superiores nas Mudanças Climáticas para a Saúde Humana, Depleção da Camada de Ozônio,

Toxicidade Humana, Formação de Oxidantes Fotoquímicos, Formação de Material Particulado, Radiação Ionizante, Mudanças Climáticas para Ecossistemas, Acidificação Terrestre, Ecotoxicidade da Água, Ecotoxicidade Marinha, Ocupação de Terra Urbana, Depleção de Recursos Minerais e Depleção de Recursos Fósseis. Na produção de agregados reciclados os danos nas categorias de Saúde Humana, Qualidades dos Ecossistemas e Recursos Naturais foram 30,9%, 30,8%, 44,2% superiores que na produção de agregados naturais. A prevalência dos impactos e danos ao meio ambiente da produção de agregados reciclados deve-se particularmente pelo transporte dos RCD até a usina de reciclagem e pelo consumo de combustíveis dos veículos de coleta.

## 5. AGRADECIMENTOS

Às companhias Itabras Mineração e Soluções em Beneficiamento de Resíduos Sólidos por participar da pesquisa e por proporcionarem as informações primárias.

## 6. REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISSO 14040/2009. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. 2009.

ABRECON. Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. Pesquisa Setorial 2014 – 2015. Relatório. São Paulo, 2015. 36 p.

Blengini GA, Garbarino E, Solar S, Shields DJ, Hámor T, Vinai R, Agioutantis Z. Life cycle assessment guidelines for the sustainable production and recycling of aggregates: the sustainable aggregates resource management project (SARMA). *Journal of Cleaner Production*; 2012; 27; 177-181.

Delbianco LB. Avaliação ambiental e técnica de usinas de reciclagem de resíduos da construção civil da Região Administrativa de Campinas – SP. [Dissertação de Mestrado] – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia. Limeira: São Paulo, 2018.

Frasson SA. Usinas de reciclagem de entulho como agentes na valoração dos resíduos gerados pela construção civil. In: Encontro Internacional de Gestão Empresarial e Meio Ambiente, 19, 2017, 04 a 05 Dez. São Paulo, São Paulo, Brasil.

Ghanbari M, Abbasi AM, Ravanshadnia M. Production of natural and recycled aggregates: the environmental impacts of energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions. *J Mater Cycles Waste Manag*; 2018; 20; 810–822.

Hossain U, Poon CS, Lo IM, Jack CP, Cheng JCP. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. *Resources, Conservation and Recycling*; 2016; 109; 67–77.

Luz B, Almeida SL, editores. Manual de Agregados para Construção Civil. 2da Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2012. 432 p.

Marinkovic S, Radonjanin V, Malešev M, Ignjatovic I. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management*; 2010; 30; 2255–2264.

Mercante IT, Bovea MD, Ibanez-Fores V, Arena AP. Life cycle assessment of construction and demolition waste management systems: a Spanish case study. *Int. J. Life Cycle Assess*; 2012; 17; 232–241.

Rosado LP, Vitale P, Penteado CS, Arena U. Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil. *Journal of Cleaner Production*; 2017; 151; 634-642.

Ulsen C, Kahn H, Ângulo S, Vanderley J. Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo. *Revista Escola de Minas*; 2010; vol. 63; núm. 2; 339-346.

Yyazdanbakhsh A, Bank L, Baez T, Wernick I. Comparative LCA of concrete with natural and recycled coarse aggregate in the New York City área. *Int J Life Cycle Assess*; 2018; 23; 1163–1173.