

# **Avaliação do ciclo de vida da produção de areia, brita e agregados reciclados para a construção civil**

## **Life cycle assessment of sand, gravel and recycled aggregates production for civil construction**

**José Luis Saravia Ocharán**  
Bolsista PCI, Eng. Ambiental, M. Sc.

**Francisco Mariano da Rocha de Souza Lima**  
Supervisor, Eng. Mineral, D. Sc.

### **Resumo**

A demanda pelos agregados naturais e reciclados para a construção civil vem associada a passivos ambientais consequentes dos próprios processos de produção que precisam ser analisados considerando os seus ciclos de vida. O objetivo do trabalho é avaliar comparativamente os impactos ambientais associados à produção de areia, brita e agregados reciclados, através da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida, baseada na norma ISO 14040, e por meio de estudos de caso no estado de 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 desses agregados, naturais e reciclados, estão associados a Mudanças Climáticas para a Saúde Humana, Mudanças Climáticas para a Qualidade dos 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 21,3%, 26,8%, 30,4% superiores que na produção de areia, e, 54,5%, 46,6%, 67,2% por acima da produção de brita, devido, principalmente, ao transporte dos resíduos da construção civil e demolição e do consumo de combustível diesel.

**Palavras chave:** avaliação do ciclo de vida, reciclagem de resíduos, mineração urbana.

### **Abstract**

The demand for natural and recycled aggregates for civil construction is associated with environmental liabilities resulting from the production processes that need to be analyzed considering their life cycles. The aim of this work is to evaluate the environmental impacts associated with the production of sand, gravel and recycled aggregates, through the Life Cycle Assessment methodology, based on ISO 14040, and by means of case studies in the São Paulo state. The environmental impact assessment method was ReCiPe and the data processing software was SIMAPRO. The results showed that the greatest impacts on the production of these aggregates, natural and recycled, are associated with Climate Change for Human Health, Climate Change for Ecosystem Quality and Depletion of Fossil Resources. It was also evidenced that in the production of recycled aggregates the damages in the Human Health, Ecosystem Qualities and Natural Resources categories were 21.3%, 26.8%, 30.4% higher than the sand production, and 54.5%, 46.6%, 67.2% above the gravel production, due to the transportation of construction and demolition waste and diesel fuel consumption.

**Key words:** life cycle assessment, waste recycling, urban mining.

## **1. Introdução**

O setor da construção civil é responsável por atender as necessidades de infraestrutura, moradia e por 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 o entupimento 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 ( $\text{CaO}$ ) presentes em concretos, argamassas, cerâmicos, aglomerantes e rochas (ULSEN et al., 2010). Essas bases minerais podem ser reaproveitadas 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 a aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) em diversos produtos do setor da construção civil, contemplando a extração de recursos naturais, passando pela fabricação de matérias-primas e insumos, construção, uso, demolição e destinação final dos RCD (YAZDANBAKSHI et al., 2018; ROSADO et al., 2017; HOSSAIN et al., 2016; BLENGINI et al., 2012; MERCANTE et al., 2012; MARINKOVIC et al., 2010). Portanto, estudos em ACV são fundamentais para o desempenho ambiental da produção agregados naturais e reciclados como base desse setor econômico.

## **2. Objetivo**

O objetivo foi realizar uma avaliação comparativa dos potenciais impactos ambientais da produção de areia, brita e agregados reciclados para o estado de São Paulo.

## **3. Material e Métodos**

Com o propósito de determinar os potenciais impactos ao meio ambiente 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 das etapas anteriores (ABNT, 2009).

### **3.1. Escopo da ACV**

As unidades funcionais comparativas foram as produções de 01 tonelada de areia, 01 tonelada de brita, 01 tonelada de agregados reciclados. 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.

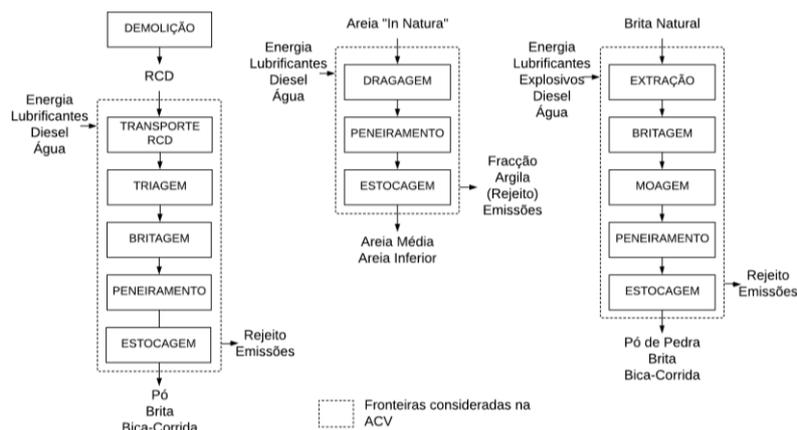


Figura 1. Produção de agregados naturais e reciclados e fronteiras consideradas no estudo de ACV.

Os dados primários da extração de areia foram coletados da Companhia Itabras Mineração LTDA e os dados da produção de agregados reciclados foram da Companhia Soluções em Beneficiamento e Comércio de Resíduos Sólidos LTDA, ambas localizadas no município de Jundiaí. Os dados da produção de brita foram obtidos 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 Jundiaí 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 onde 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 a extração do minério, passando por operações de britagem, moagem, peneiração e estocagem do **Pó de Pedra**, **Brita 0**, **Brita 1** e **Bica-Corrida**.

Não foi contemplado o transporte interno de matérias-primas e insumos na produção de areia, brita e agregados reciclados. Considerou-se uma distância de 10 km para o transporte dos RCD até a usina de reciclagem.

### 3.2. Inventário do ciclo de vida (ICV)

O ICV envolve a coleta de dados e cálculos para quantificar as entradas e saídas de um sistema produto segundo as fronteiras de estudo (MARINKOVIC et al., 2010). Os dados primários e secundários foram referentes às matérias-primas, insumos, eletricidade, combustíveis, lubrificantes, água, produtos finais e resíduos sólidos para cada unidade funcional. As emissões foram calculadas pela base de dados Ecoinvent v.3.0.

### 3.3. Método de avaliação de impacto do ciclo de vida

A metodologia de avaliação do ICV foi RECIPE v.1.08 e o *software* usado foi 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.

### 4. Resultados e Discussão

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

Tabela 1. ICV para a produção de 01 t de areia, 01 t de brita e 01 t de agregado reciclado.

Fluxos de Entrada		Areia	Brita	Reciclado	
<i>Matéria-Prima &amp; Insumos</i>	Areia Natural "in natura" (t)	1,127	--	--	
	Basalto (t)	--	1,05	--	
	RCD (t)	--	--	1,25	
	Explosivo (tovex) (kg)	--	0,145	--	
	Eleticidade (kWh)	2,4925	3,720	1,4824	
	Água (m <sup>3</sup> )	2,0748	0,0081	0,0010	
	Diesel (l)	0,9283	0,2309	0,8706	
	Óleo Lubrificante (l)	0,0209	0,0073	0,0252	
	Transporte RCD (t.km)	--	--	10	
Fluxos de Saída		Areia	Brita	Reciclado	
<i>Produtos &amp; Co-Produtos &amp; Resíduos</i>	Agregado Natural - Areia (t)	1	--	--	
	Agregado Natural - Brita (t)	--	1	--	
	Agregado Reciclado - Misto (t)	--	--	1	
	Fração de Argila (t)	0,127	--	--	
	Rejeito - Pedreira (t)	--	0,05	--	
	Rejeito - Reciclagem (t)	--	--	0,25	
<i>Emissões para o Ar</i>	CO <sub>2</sub> (kg)	3,5399	1,9445	4,7981	
	CO (kg)	0,0163	0,0124	0,0156	
	CH <sub>4</sub> (kg)	0,0082	0,0085	0,0086	
	NO <sub>x</sub> (kg)	0,0368	0,0117	0,0428	
	SO <sub>2</sub> (kg)	0,0045	0,0046	0,0060	
	SO <sub>4</sub> (kg)	2,987E-06	9,332E-06	5,908E-06	
	SO <sub>x</sub> (kg)	2,969E-06	4,486E-06	2,186E-06	
	NM VOC (kg)	0,0066	0,0021	0,0081	
	Partículas < 10 um (kg)	0,0042	0,0021	0,0048	
	NH <sub>3</sub> (kg)	0,0001	0,0005	9,766E-05	
	N <sub>2</sub> O <sub>x</sub> (kg)	0,0003	0,0014	0,0003	
	Etano / Metano - HFC, HCFC, HCC, CFC (kg)	1,696E-07	9,254E-07	4,317E-06	
	<i>Emissões para a Água</i>	PO <sub>4</sub> (kg)	9,400E-05	0,0002	0,0002
		NO <sub>3</sub> (kg)	0,0003	0,0006	0,0002
N (kg)		2,021E-05	4,179E-05	2,364E-05	
Cl (kg)		0,0114	0,0081	0,0160	
SO <sub>4</sub> (kg)		0,0012	0,0024	0,0020	
Na (kg)		0,0059	0,0036	0,0082	
Mg (kg)		0,0002	0,0001	0,0002	
Ca (kg)		0,0008	0,0008	0,0011	
K (kg)		8,789E-05	4,763E-05	0,0001	
Zn (kg)		2,302E-05	1,040E-05	4,279E-05	
P (kg)		1,066E-06	1,424E-06	1,101E-06	
Fe (kg)		9,106E-05	0,0002	8,563E-05	
<i>Emissões para o Solo</i>		Oils (kg)	0,00052	0,00026	0,0007
		Zn (kg)	1,540E-06	2,278E-06	9,946E-06
	Cu (kg)	1,313E-07	2,131E-07	3,169E-07	
	Fe (kg)	3,093E-05	3,803E-05	3,784E-05	
	B (kg)	6,623E-08	3,228E-08	9,763E-08	
	Cd (kg)	1,267E-08	1,930E-08	1,133E-08	
	Pb (kg)	8,613E-08	1,171E-07	1,953E-07	

Nota-se que os consumos de diesel e água são maiores na produção de agregados reciclados. Adicionalmente, de todas as emissões geradas, as dispostas para o ar são as mais significativas, seguidas pelas emissões para a água e pelas emissões para o solo.

A Tabela 2 apresenta os impactos e as contribuições percentuais dentro das categorias de danos para produzir areia, brita e agregados reciclados.

Tabela 2. Avaliação do impacto da produção de 01 t de areia, 01 t de brita e 01 t de agregados reciclados.

<b>Categorias de Danos</b>	<b>Categorias de Impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>Areia</b>	<b>%</b>	<b>Brita</b>	<b>%</b>	<b>Ag. Rec.</b>	<b>%</b>
Saúde Humana	Mudanças Climáticas para Saúde Humana	DALY	5,3E-06	60,4%	3,5E-06	69,1%	7,1E-06	63,4%
	Depleção da Camada de Ozônio	DALY	5,9E-10	0,0%	2,5E-10	0,0%	8,6E-10	0,0%
	Toxicidade Humana	DALY	4,4E-08	0,5%	8,6E-08	1,7%	8,1E-08	0,7%
	Formação de Oxidantes Fotoquímicos	DALY	1,7E-09	0,0%	5,8E-10	0,0%	2,0E-09	0,0%
	Formação de Material Particulado	DALY	3,4E-06	39,0%	1,5E-06	29,2%	4,0E-06	35,8%
	Radiação Ionizante	DALY	3,1E-09	0,0%	1,5E-09	0,0%	4,4E-09	0,0%
Qualidade dos Ecossistemas	Mudanças Climáticas para Ecossistemas	espécies.ano	3,0E-08	91,0%	2,0E-08	82,4%	4,0E-08	88,9%
	Acidificação Terrestre	espécies.ano	1,5E-10	0,4%	7,2E-11	0,3%	1,8E-10	0,4%
	Eutrofização da Água	espécies.ano	1,7E-12	0,0%	3,2E-12	0,0%	2,6E-12	0,0%
	Ecotoxicidade Terrestre	espécies.ano	1,3E-10	0,4%	1,9E-10	0,8%	1,0E-10	0,2%
	Ecotoxicidade da Água	espécies.ano	4,4E-13	0,0%	3,2E-13	0,0%	6,4E-13	0,0%
	Ecotoxicidade Marinha	espécies.ano	4,7E-13	0,0%	3,6E-13	0,0%	8,5E-13	0,0%
	Ocupação de Terra Agrícola	espécies.ano	1,1E-09	3,4%	2,2E-09	9,2%	1,1E-09	2,3%
	Ocupação de Terra Urbana	espécies.ano	1,5E-10	0,4%	1,9E-10	0,8%	2,4E-09	5,3%
Transformação de Terra Natural	espécies.ano	1,4E-09	4,3%	1,6E-09	6,5%	1,3E-09	2,9%	
Consumo de Recursos Naturais	Depleção de Recursos Minerais	\$	9,5E-03	4,6%	7,3E-03	7,6%	1,5E-02	5,2%
	Depleção de Recursos Fósseis	\$	1,9E-01	95,4%	8,9E-02	92,4%	2,8E-01	94,8%

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

Nota-se que na produção de areia: 1) os principais danos à Saúde Humana devem-se às Mudanças Climáticas (60,4%) e à Formação de Material Particulado (39,0%); 2) o dano à Qualidade dos Ecossistemas é causado principalmente pelas Mudanças Climáticas (91,0%); e, 3) o dano relacionado ao Consumo de Recursos Naturais é originado especialmente pela Depleção de Recursos Fósseis (95,4%). Observa-se na produção de brita: 1) os principais danos à Saúde Humana também são devidos às Mudanças Climáticas (69,1%) e à Formação de Material Particulado (29,2%); 2) o dano à Qualidade dos Ecossistemas é também originado na sua maioria pelas Mudanças Climáticas (82,4%); e, 3) o dano referente ao Consumo de Recursos Naturais é causado, sobretudo, pela Depleção de Recursos Fósseis (92,4%). Na produção de agregados reciclados: 1) os danos à Saúde Humana igualmente são causados pelas Mudanças Climáticas (63,4%) e Formação de Material Particulado

(35,8%); 2) o dano à Qualidade dos Ecossistemas é similarmente originado pelas Mudanças Climáticas (88,9%); e, 3) o dano relacionado ao Consumo de Recursos Naturais é devido à Depleção de Recursos Fósseis (94,8%).

As categorias mais relevantes têm o mesmo padrão de causa para a produção de areia, brita e agregados reciclados. A causa principal na Depleção de Recursos Fósseis é a exploração e produção de petróleo e gás liquefeito de petróleo. Os impactos nas Mudanças Climáticas devem-se pelas emissões geradas no uso e queima do combustível diesel durante o funcionamento das máquinas pesadas (tratores) e dos veículos de transporte de carga, e, em segundo lugar, pelas emissões originadas durante a produção de energia de fontes como carvão, petróleo, biomassa e gás natural, da matriz energética brasileira, usada no funcionamento dos geradores elétricos que acionam as diversas maquinarias. No caso da Formação de Material Particulado, as emissões e finos produzidos através do uso e queima de combustível são as principais causas, além do pó gerado durante as operações de britagem e peneiramento.

Desde outras perspectivas de análises, a Figura 2 exhibe as contribuições percentuais das produções de areia, brita e agregados reciclados dentro de cada categoria de impacto ambiental e a Figura 3 evidencia as contribuições, desde uma pontuação única, das produções de areia, brita e agregados reciclados para cada categoria de danos.

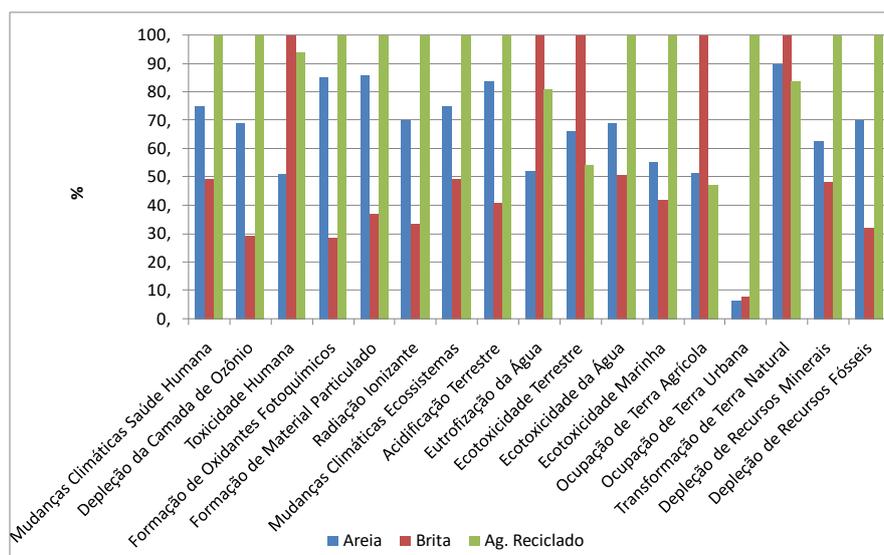


Figura 2. Comparação dos impactos ambientais da produção de areia, brita e agregados reciclados.

As diferenças percentuais indicam que os impactos são maiores na produção de agregados reciclados para quase todas as categorias. Por outro lado, na Toxicidade Humana, Eutrofização da Água, Ecotoxicidade Terrestre, Ocupação de Terra Agrícola e Transformação de Terra Natural, as diferenças demonstram que os impactos são superiores na produção de brita.

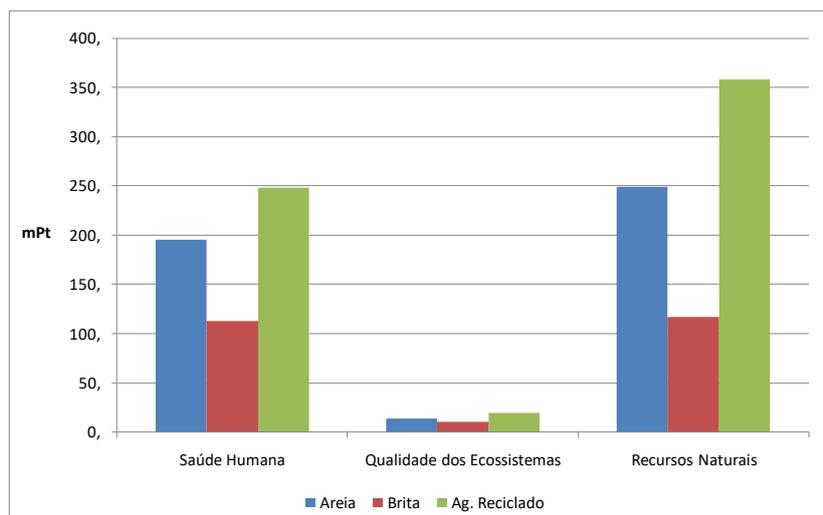


Figura 3. Danos ambientais da produção de areia, brita e agregados reciclados.

Igualmente, desde uma pontuação única, a produção de agregados reciclados prejudica mais ao meio ambiente. Na Saúde Humana, Qualidades dos Ecossistemas e Recursos Naturais, os danos da produção de agregados reciclados são 21,3%, 26,8%, 30,4% maiores que na produção areia, e, 54,5%, 46,6%, 67,2% superiores quando comparado com a produção de brita. A predominância desses impactos e danos ambientais serem maiores na produção de agregados reciclados radica fundamentalmente pelas quantidades consumidas de combustível durante o transporte dos RCD e pela distância percorrida desde os pontos de geração até a usina de reciclagem.

## 5. Conclusão

O trabalho avaliou comparativamente os ciclos de vida das produções de 01 tonelada de areia, 01 tonelada de brita e 01 tonelada de agregados reciclados no estado de São Paulo. Os impactos com maior contribuição às categorias de danos, para esses três tipos de agregados, foram Mudanças Climáticas para a Saúde Humana, Mudanças Climáticas para a Qualidade dos Ecossistemas e Depleção de Recursos Fósseis para os Recursos Naturais. Os danos na Saúde Humana, Qualidades dos Ecossistemas e Recursos Naturais são 21,3%, 26,8%, 30,4% superiores na produção de agregados reciclados quando comparado com a produção da areia e também são 54,5%, 46,6%, 67,2% por acima da produção de brita. 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 combustível dos veículos de coleta.

## 6. Agradecimento

Às companhias Itabras Mineração Ltda. e Soluções em Beneficiamento de Resíduos Sólidos Ltda. por participarem da pesquisa. Agradecimentos ao CNPq e ao CETEM pela bolsa concedida e apoio na pesquisa.

## 7. Referências Bibliográficas

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, G.A.; GARBARINO, E.; SOLAR, S.; SHIELDS, D. J.; 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**, 27, p. 177-181, 2012.

DELBIANCO, L.B. **Avaliação ambiental e técnica de usinas de reciclagem de resíduos da construção civil da Região Administrativa de Campinas – SP**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas. Limeira: São Paulo, 2018.

FRASSON, S.A. 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. *Anais ...* São Paulo, São Paulo, Brasil.

GHANBARI, M.; ABBASI, A.M.; RAVANSHADNIA, M. Production of natural and recycled aggregates: the environmental impacts of energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, 20, p. 810–822, 2018.

HOSSAIN, U.; POON, C.S.; LO, I.M.; JACK, C.P.; CHENG, J.C.P. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. **Resources, Conservation and Recycling**, 109, p. 67–77, 2016.

LUZ, B.; ALMEIDA, S.L. 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**, 30, p. 2255–2264, 2010.

MERCANTE, I.T.; BOVEA, M.D.; IBAÑEZ-FLORES, V.; ARENA, A.P. Life cycle assessment of construction and demolition waste management systems: a Spanish case study. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 17, p. 232–241, 2012.

ROSADO, L.P.; VITALE, P.; PENTEADO, C.S.; ARENA, U. Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, 151, p. 634-642, 2017.

ULSEN, C.; KAHN, H.; ÁNGULO, S.; VANDERLEY, J. Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo. **Revista Escola de Minas**, 63 - 2, p. 339-346, 2010.

YYAZDANBAKSH, A.; BANK, L.; BAEZ, T.; WERNICK, I. Comparative LCA of concrete with natural and recycled coarse aggregate in the New York City área. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 23, p. 1163–1173, 2018.