

# Academic<sup>th</sup>

INTERNATIONAL WORKSHOP  
ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION

“CLEANER PRODUCTION TOWARDS A SUSTAINABLE TRANSITION”

## Avaliação das Eficiências Energética, Global, e Emissões de CO<sub>2</sub> da Produção de Areia a Partir de Resíduos da Construção Civil

BORGES, R.F.M.<sup>b</sup>, AGOSTINHO, F.<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Universidade Paulista (UNIP), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Laboratório de Produção e Meio Ambiente

<sup>b</sup> Universidade Paulista (UNIP), Graduação em Engenharia Civil

\*Corresponding author, feniagostinho@gmail.com

### Resumo

Ao mesmo tempo em que gera PIB e colabora para o crescimento econômico e social, a construção civil é grande geradora de impactos ambientais. Entre eles, o Resíduo da Construção Civil (RCC) merece atenção porque corresponde a cerca de 50% do total de resíduos sólidos gerados no planeta. Especificamente para a cidade de São Paulo, Brasil, o RCC corresponde a 66% em massa do total de resíduos sólidos urbanos, o que demanda elevado custo econômico e energético para transportar o RCC até sua destinação final que geralmente são os aterros sanitários. Na tentativa de contornar este problema, o uso do RCC para a produção de areia vem sendo considerada como uma alternativa, pois corresponde a até 50% em massa do RCC reciclado. Por outro lado, a reciclagem de RCC para produzir areia demanda recursos materiais, energéticos e mão de obra para transportar o RCC até a usina recicladora e em todos os outros processos envolvidos na separação, redução de tamanho, classificação, e transporte final do produto até o usuário final. Este trabalho avalia o processo de reciclagem do RCC com auxílio de indicadores energético-ambientais, mais precisamente a avaliação da energia incorporada, a contabilidade ambiental em energia (com “m”), e o potencial de aquecimento global (PAG). Os resultados mostram que a eficiência energética (0,12 MJ/kg areia), global (3,09E10 seJ/kg areia) e PAG (0,016 kgCO<sub>2-eq</sub>/kg areia) da areia reciclada a partir de RCC possui melhor desempenho quando comparado aos valores de referência considerados para a areia natural, obtida a partir de cascalho em pedra, e extraída do oceano. Reconhece-se que outros valores de referência ainda precisam ser calculados e utilizados para auxiliar em comparações mais cientificamente apropriadas, porém a areia a partir da reciclagem de RCC sugere, a priori, ser uma boa alternativa à areia obtida de outras fontes.

**Palavras-chave:** Aquecimento global; Contabilidade ambiental em energia; Energia incorporada; Reciclagem de areia.

### 1. Introdução

A construção civil é um importante segmento da indústria brasileira, tida com um indicativo do crescimento econômico e social. Em 2012, a construção civil foi responsável por 5,7% do Produto Interno Bruto (PIB) Brasileiro. Por outro lado, também constitui uma atividade geradora de impactos ambientais, onde seus resíduos têm representado um grande problema a ser administrado (PNRS, 2011).

Entre outros potenciais impactos, a correta destinação dos Resíduos da Construção Civil (RCC)<sup>1</sup> é considerada como grande desafio para os centros urbanos. Segundo John (2000), este tipo de material corresponde a mais de 50% do volume total de resíduos sólidos produzidos no planeta. O Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo (Sinduscon, 2012) estima que são gerados entre 0,4 a 0,7 toneladas de RCC por habitante por ano, representando aproximadamente 66% da massa total dos resíduos sólidos municipais ou duas vezes a massa de resíduos sólidos domiciliares. Esses valores correspondem a um total de 99.354 toneladas de RCC geradas diariamente no Brasil (PNRS, 2011). Além de volumosos, esta quantidade de material exige elevado custo energético para seu transporte até os aterros sanitários – geralmente sua destinação final.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, lei nº 12.305/10 (BRASIL, 2010), é responsável pela regulamentação sobre o tratamento e destino adequado aos quais os RCC devem ser submetidos. A resolução CONAMA 307 de 2002 (CONAMA, 2002) também é considerada como uma das principais referências legais sobre a classificação e destinação adequada dos RCC, visando reduzir, reutilizar ou reciclar resíduos. Para o setor da construção civil, a reciclagem possui potencial para reduzir a necessidade de energia, recursos naturais, necessidade de área para extração de matéria prima e de área para disponibilização final dos resíduos. Entretanto, como enfatizado por Thormark (2001), os benefícios da reciclagem dependem dos materiais a serem reciclados e dos processos de reciclagem envolvidos. O mesmo autor argumenta que reciclando RCC pode resultar em consideráveis economias de energia e recursos naturais não renováveis, atingindo valores de 20% a 40% de economia dependendo da forma como a reciclagem é realizada. Coelho e Brito (2013), estudando a reciclagem de RCC em Portugal, estimaram que as emissões de CO<sub>2</sub>-eq. são dez vezes inferiores quando comparado ao uso de recursos não reciclados, além de obter uma redução na demanda de energia primária na ordem de oito vezes.

Neste cenário a reciclagem de areia<sup>2</sup> merece papel de destaque. Segundo Ulsen et al. (2010; 2013), a areia vem sendo considerada como foco de muitos estudos devido à sua representatividade no total de RCC após o processo de reciclagem, atingindo até 50% em massa. Dados experimentais (Cachim, 2009; Moriconi et al., 2003; Ulsen et al., 2013; Figueiredo et al., 2011; Tenório et al., 2012) tem mostrado a viabilidade técnica da substituição parcial da areia natural pela reciclada a partir de RCC. Lintz et al. (2012) argumentam que a areia reciclada pode ser utilizada como aglomerado complementar para a obtenção de concreto em alguns casos específicos considerados de menor importância estrutural.

O processo de obtenção e uso de areia a partir da reciclagem de RCC sugere ser uma excelente alternativa à areia extraída do meio natural, pois além de potencialmente reduzir os impactos diretos e indiretos sobre o meio ambiente, o RCC não seria enviado aos aterros. Por outro lado, o processo de reciclagem demanda recursos como máquinas e equipamentos, transporte, mão de obra, e energia. Neste sentido, este trabalho objetiva avaliar o processo de reciclagem de areia a partir de RCC. Para isso, indicadores de diagnóstico energético-ambiental são utilizados, mais precisamente: (i) avaliação de eNergia incorporada, (ii) a contabilidade ambiental em eMergia, e (iii) as emissões diretas e indiretas de CO<sub>2</sub> para estimar o potencial de aquecimento global.

## 2. Métodos

### 2.1. Descrição do sistema

Em 2009, a areia comercializada no Estado de São Paulo foi de 65 milhões de toneladas, movimentando cerca de 1 bilhão de Reais (DNPM, 2010). A cidade de São Paulo se destaca por possuir o preço da areia mais alto encontrado no mercado, atingindo cerca de 20% a mais do que o Distrito

---

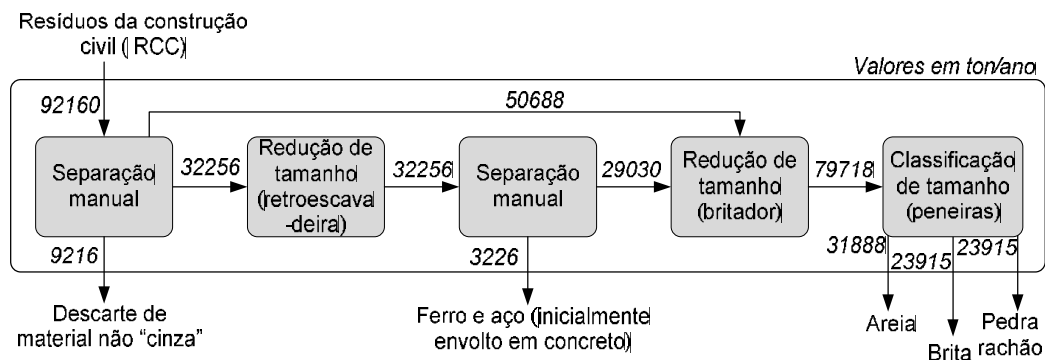
<sup>1</sup> Definidos no Artigo 13 da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) como sendo os resíduos gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis.

<sup>2</sup> O termo areia, quando usado para identificar um tipo de recurso mineral, designa um material granular, com tamanho em um intervalo definido (2 a 0,06 mm), de composição silicática, em geral com predominância do mineral quartzo. Atualmente, compreende, além dos materiais naturais, a chamada areia artificial, produto da britagem de rochas, normalmente subproduto da indústria de rochas britadas (DNPM, 2012).

Federal, considerado o segundo mercado mais valorizado em 2011 (BRASIL, 2012). Devido a estas características, a areia produzida e comercializada na cidade de São Paulo é o foco deste estudo.

De acordo com a resolução 307 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 2002), os Resíduos da Construção Civil (RCC) são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha. Neste estudo, o RCC avaliado enquadra-se na “Classe A” da referida resolução, ou seja, é o chamado material “cinza” proveniente de concreto e reutilizável ou reciclável na forma de agregados.

Dentre as várias possibilidades existentes para se reciclar os diferentes tipos de RCC (madeira, alvenaria, ferro, areia, etc.), a reciclagem de areia como diagramada pela Figura 1 é considerada no presente projeto de pesquisa devido à sua representatividade dentre os processos de separação mais comumente utilizados no mercado.



**Fig. 1.** Principais processos envolvidos na reciclagem de areia a partir de resíduos da construção civil avaliado neste trabalho.

De acordo com informações levantadas *in situ*, o material a ser reciclado pelos processos da Fig. 1 é proveniente de RCC e classificados como Classe “A”, isto é, material fino ou cinza, predominantemente oriundos de argamassas, blocos de concreto, concreto, e cimento em geral. Esta restrição existe para evitar a necessidade de tratamentos/processos posteriores aos representados pela Fig. 1. Após receber o RCC, existe uma verificação de sua adequação, onde são excluídos os materiais “não cinza” como isopor, madeira, ferro, entre outros. Os materiais podem estar secos ou úmidos. Parte do RCC considerado apto para a reciclagem é levada diretamente ao britador, enquanto outra parte necessita de uma prévia redução de tamanho (por uma retro-escavadeira); esta etapa prévia é importante para separar o aço contido no RCC. Todo o material a ser reciclado é então colocado em um funil coletor, que mantém um fluxo constante de material entrando no britador de impacto. Finalmente o material triturado é classificado por peneiras/grelhas com diferentes *mesh*. Os produtos finais são areia, brita e pedra rachão. A Fig. 1 mostra valores médios dos fluxos do sistema estudado, mas de acordo com a demanda, peneiras com *mesh* diferentes podem ser utilizadas. De qualquer forma, areia com diâmetro inferior a 4,8 mm é a mais produzida, devido a sua grande utilização em vedação, argamassas e afins.

## 2.2. Análise de energia incorporada

O método da Energia Incorporada (Slesser, 1974) objetiva avaliar o requerimento bruto direto e indireto de energia pelo sistema. Esse método oferece um indicador útil sobre a eficiência energética do bem ou serviço produzido em uma escala maior de avaliação, pois considera toda a energia “comercial” incorporada por ele. Fatores de intensidade de energia (isto é, energia fóssil previamente consumida por unidade de produto, usualmente em unidades de MJ/unidade) são utilizados para converter todos os materiais e energia que entram no sistema em estudo em energia fóssil equivalente. Neste trabalho, fatores de intensidade de energia fóssil foram extraídos de Ecoinvent Database v3.1 2014 (www.ecoinvent.ch). A soma da energia fóssil equivalente de cada entrada mostra

a quantidade bruta de energia “comercial” necessária para produzir uma tonelada de areia em MJ/ton<sub>areia</sub>.

### 2.3. Contabilidade ambiental em emergia

O método da avaliação em eMergia (Odum, 1996) também foca no desempenho ambiental do sistema em uma escala global, mas esse método considera todas as entradas consideradas “gratuitas” da natureza (radiação solar, vento, chuva, etc.), assim como o suporte ambiental indireto incorporado pelo trabalho humano (mão de obra) e serviços. Na análise de eNergia incorporada, essas entradas não são consideradas. Na avaliação em eMergia, a contabilidade é estendida de volta no tempo para incluir o trabalho da natureza necessário para a formação de um recurso. Todas as entradas são contabilizadas em termos de emergia solar, definida como a “quantidade total de energia solar disponível (exergia) que foi diretamente ou indiretamente requerida para fazer um determinado produto ou para suportar um determinado fluxo” (Odum, 1996 p.7). Sua unidade é Joules solares equivalentes (seJ). A quantidade de emergia requerida para produzir uma unidade de cada fluxo de energia e/ou matéria que entra no sistema é referida como seu Valor Unitário de Emergia (UEV em inglês; seJ/unidade), e pode ser considerada como um fator de “qualidade” dentro de uma escala hierárquica de energia da biosfera. Neste trabalho, o indicador UEV será considerado (seJ/ton<sub>areia</sub>) para representar o sistema estudado, mostrando a eMergia total necessária para disponibilizar 1 ton de areia. Este indicador, quando calculado de forma inversa (ton<sub>areia</sub>/seJ), é também chamado como de produtividade global (Bonilla et al., 2010), indicando a quantidade de recursos em uma escala global necessários para disponibilizar 1 ton de areia.

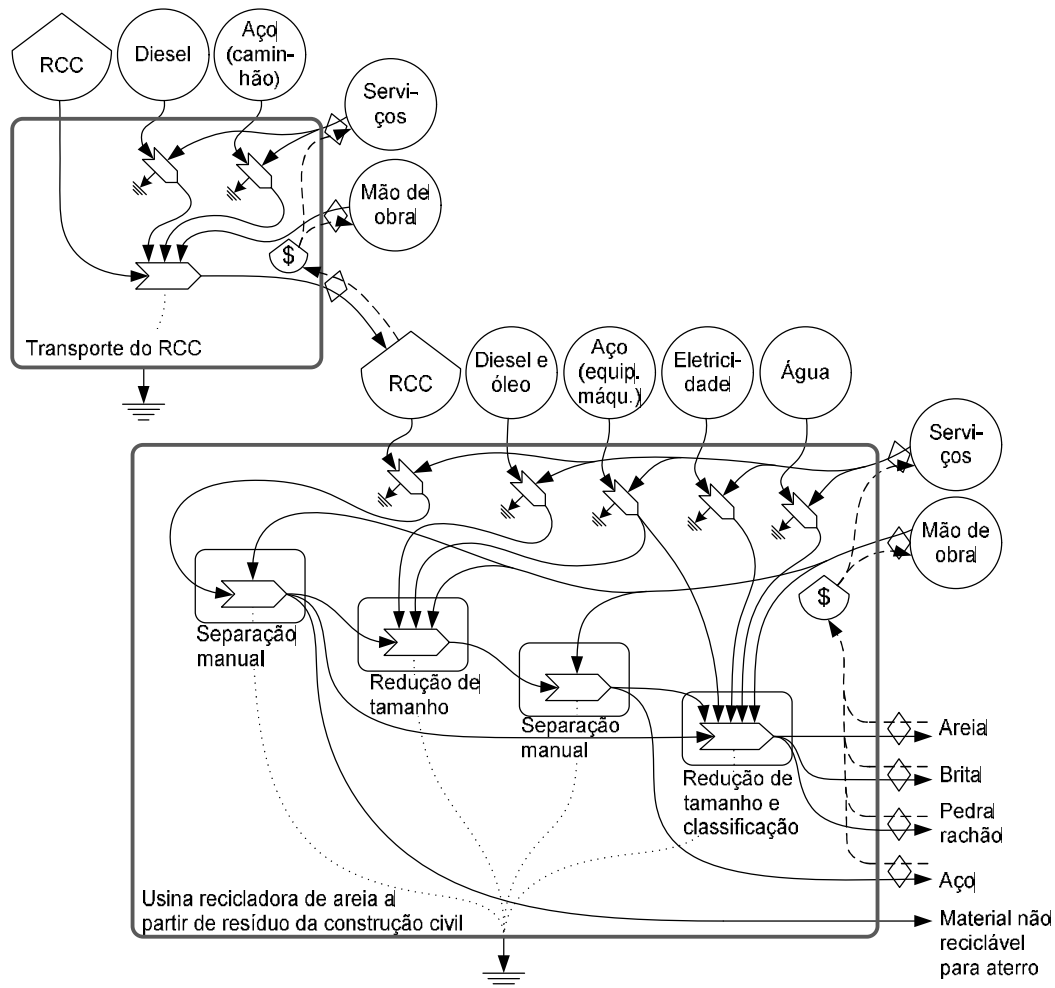
### 2.4. Potencial de aquecimento global (PAG)

Nesta abordagem são contabilizadas as emissões indiretas (causadas a montante) e as emissões diretas (causadas a jusante) do sistema em estudo. Para a estimativa das emissões indiretas, o procedimento de cálculo consiste basicamente em utilizar fatores de intensidade de emissão de CO<sub>2</sub> (em kgCO<sub>2eq</sub>/Unidade) e multiplicá-los pelas respectivas quantidades de recursos que entram no sistema estudado. Os fatores de intensidade utilizados neste trabalho foram extraídos de Ecoinvent Database v3.1 2014 (www.ecoinvent.ch). A soma mostra o PAG a montante do sistema. Para as emissões diretas, são contabilizadas basicamente as emissões oriundas dos processos de combustão (transporte e máquinas a combustão). Para isso, os seguintes fatores (em g<sub>gás</sub>/MJ<sub>óleo</sub>) propostos pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 2008) são considerados: 6,70 10<sup>-04</sup> para Hidrocarbonetos; 1,70 10<sup>-02</sup> para CO; 8,30 10<sup>-05</sup> para CH<sub>4</sub>; 3,70 10<sup>-04</sup> para N<sub>2</sub>O; e 76,2 para CO<sub>2</sub>. A influencia (ou peso) da cada gás no total do PAG a jusante é estabelecido de acordo com o seguinte critério (Jensen et al., 1997): CO<sub>2</sub> = 1, CH<sub>4</sub> = 62, N<sub>2</sub>O = 290, CO = 1,6, e Hidrocarbonetos = 3,1. A soma das emissões a montante com as a jusante resulta no Potencial de Aquecimento Global (PAG) resultante da produção de 1 tonelada de areia nas unidades de tonCO<sub>2-eq</sub>/ton<sub>areia</sub>.

## 3. Resultados e discussão

O diagrama de energia da Fig. 2 mostra, além dos processos internos de matéria e energia existentes durante a reciclagem de areia a partir do RCC, a demanda externa de materiais, energia, serviços e mão de obra essenciais à implementação e operação da usina recicladora. A etapa de transporte também é considerada, pois exige grande quantidade de diesel, além de aço (dos caminhões) e mão de obra. A usina demanda basicamente diesel e óleo para movimentar as máquinas e equipamentos - sua estrutura em aço também é contabilizada -, além de eletricidade (para movimentar esteiras), água (para controlar a poeira liberada), mão de obra e serviços. Como produtos tem-se a areia, brita, pedra rachão, aço (que é enviado para ser reciclado por outro sistema), e outros materiais que não são reciclados na usina e enviados para o aterro sanitário.

Após entender o funcionamento do sistema através da identificação dos processos internos, dependência de recursos externos, produtos, etc, os fluxos que cruzam as fronteiras do sistema são contabilizados e convertidos em unidades de energia incorporada na produção de 1 ton de areia reciclada (MJ/ton areia), emergia solar (seJ/ton areia), e potencial de aquecimento global indireto (kgCO<sub>2-eq</sub>/ton areia); veja Tabela 1. Os subitens a seguir apresentam a discussão de cada abordagem metodológica considerada.



**Fig. 2.** Diagrama de energia mostrando as principais entradas e saídas de materiais e energia da usina recicladora de areia a partir de resíduos da construção civil (RCC). Legenda: Círculo = fonte externa; Retângulos internos = processos; Retângulo maior = fronteiras do sistema em estudo; Linhas com setas = fluxos de massa/energia; Setas grandes = interação entre fluxos de massa/energia. Maiores detalhes sobre a simbologia utilizada pode ser encontrada em Odum (1996).

### 3.1. Energia incorporada

A Tabela 1 mostra que o diesel é o item que mais contribui (92,5%) para a energia incorporada no processo de reciclagem de areia a partir de RCC, seguido pelo óleo (4,6%) e aço (2,5%); eletricidade e água são responsáveis por apenas 0,2% cada um. Desta forma, se o objetivo é reduzir o custo energético na produção de areia a partir de RCC, o consumo de diesel deveria ser reduzido pela adoção de máquinas mais eficientes, incluindo retroescavadeira, britador, pá carregadeira, e caminhão utilizado para transporte. O valor total obtido de 0,125 MJ/kg de areia reciclada está dentro de alguns valores encontrados em literatura que variam entre 0,02 e 0,63 MJ/kg (Tabela 2), porém é importante ressaltar que estes valores de referência representam sistemas diferentes (por exemplo, areia de cascalho e extração natural) ao estudado neste trabalho (reciclagem de areia a partir de RCC). Outra diferença é que a etapa de transporte é considerada no presente estudo de caso, enquanto ela é desconsiderada nos valores de referência comparados. De qualquer forma, mesmo com a inclusão da etapa de transporte no presente estudo, o valor calculado de 0,125 MJ/kg de areia reciclada ainda está mais próximo do valor mínimo considerado como referência para comparação apresentado na Tabela 2, o que, em princípio, indica boa eficiência energética para a areia reciclada.

**Tabela 1.** Energia incorporada, energia, e potencial de aquecimento global (PAG) indireto decorrentes da produção de 1 ton de areia reciclada a partir de resíduos da construção civil.

Nota <sup>a</sup>	Item	Energia <sup>b</sup>		Emergia <sup>c</sup>		PAG indireto <sup>d</sup>	
		MJ	%	seJ	%	kgCO <sub>2-eq.</sub>	%
Usina recicladora							
1	RCC	-	-	-	-	-	-
2	Mão de obra	-	-	8,57E+12	27,7	-	-
3	Diesel	5,75E+01	45,9	7,28E+12	23,5	3,94E+00	40,9
4	Óleo	5,75E+00	4,6	7,28E+11	2,4	3,94E-01	4,1
5	Água	2,28E-01	0,2	4,24E+11	1,4	1,83E-02	0,2
6	Aço	2,71E+00	2,2	1,83E+11	0,6	3,06E-01	3,2
7	Eletricidade	2,09E-01	0,2	8,22E+11	2,7	9,29E-01	9,6
8	Serviços	-	-	8,16E+11	2,6	-	-
	Subtotal:	6,64E+01	53,0	1,88E+13	60,9	5,59E+00	58,0
Transporte do resíduo da construção civil							
9	Mão de obra	-	-	6,37E+11	2,1	-	-
10	Diesel	5,84E+01	46,6	7,39E+12	23,9	4,00E+00	41,5
11	Aço	4,15E-01	0,3	2,80E+10	0,1	4,68E-02	0,5
12	Serviços	-	-	4,04E+12	13,1	-	-
	Subtotal:	5,88E+01	47,0	1,21E+13	39,1	4,05E+00	42,0
	Total:	1,25E+02	100,0	3,09E+13	100,0	9,64E+00	100,0

<sup>a</sup> Detalhes de cálculo no Apêndice B; <sup>b</sup> Energia = Fluxo (Apêndice B) \* Intensidade de energia (Apêndice A); <sup>c</sup> Emergia = Fluxo (Apêndice B) \* UEV (Apêndice A); <sup>d</sup> Potencial de Aquecimento Global (PAG) indireto = Fluxo (Apêndice B) \* Intensidade de PAG (Apêndice A). O PAG direto, que refere-se a queima direta de diesel pela usina (pelas máquinas) e na etapa de transporte do RCC, é incluído somente nas discussões.

**Tabela 2.** Alguns valores de energia, energia incorporada, e potencial de aquecimento global da produção/extração de areia encontrados em literatura científica.

Metodologia/Referência	Valor	Unidade	Observação
<i>Energia Incorporada</i>			
Este trabalho	0,12	MJ/kg	Areia reciclada de RCC; Tabela 1
Ecoinvent Database v3.1 <sup>a</sup>	0,03	MJ/kg	Areia de cascalho em pedra
Boustead e Hancock, 1979	0,02 – 0,63	MJ/kg	Extração natural de areia
<i>Energia <sup>b</sup></i>			
Este trabalho	3,09 E10	seJ/kg	Areia reciclada de RCC; Tabela 1
Odum, 2000	8,50 E12	seJ/kg	Formação do arenito (ciclo natural)
Yang e Kang, 2011	8,54 E12	seJ/kg	Extração de areia do mar (atualiz.)
<i>Potencial de aquecimento global total (indireto + direto<sup>3</sup>) = (9,64 + 6,18) kgCO<sub>2-eq./ton areia</sub></i>			
Este trabalho	0,016	kgCO <sub>2-eq./kg</sub>	Areia reciclada de RCC; Tabela 1
Ecoinvent Database v3.1 <sup>a</sup>	0,034	kgCO <sub>2-eq./kg</sub>	Areia de cascalho em pedra

<sup>a</sup> Ecoinvent Database v3.1 2014 (www.ecoinvent.ch); "gravel and sand quarry operation, CH" e "silica sand production, DE"; <sup>b</sup> Valores de energia atualizados para a linha base de 15.83E24 seJ/ano (Odum, 2000).

### 3.2. Contabilidade ambiental em energia

Da energia total calculada na Tabela 1, o item diesel novamente representa a maior parte, atingindo 23,5% na usina recicladora e 23,9% no transporte. Por outro lado, sua representatividade comparada à intensidade energética diminuiu de 92,5% para 47,4%, mostrando que a energia possui escala de avaliação maior, considerando outros aspectos/itens que não são contabilizados pela análise de energia incorporada. Por exemplo, o segundo item mais representativo é a mão de obra (29,8%), item este não contabilizado pela análise de energia. Objetivando a redução da demanda de energia e aumento da eficiência global do sistema, esforços poderiam ser realizados na tentativa de melhorar a eficiência no uso de diesel (na usina e na etapa de transporte), mas sempre objetivando na manutenção ou aumento da produtividade do sistema. A redução na mão de obra também reduziria a eficiência global, mas os aspectos sociais relacionados alertam para se ter cuidados neste tipo de ação. Excluindo os serviços, os itens eletricidade (2,7%), óleo (2,4%) e aço (0,7%) aparecem respectivamente na 3<sup>a.</sup>, 4<sup>a.</sup>, e 5<sup>a.</sup> posições de destaque. A demanda de energia calculada neste trabalho para reciclar 1 kg de areia a partir de RCC (3,09E10 seJ/kg) é menor comparada aos valores de referência apresentados na

<sup>3</sup> Calculado através do total de diesel queimado no transporte do RCC e nas máquinas da usina recicladora (4,02E7 J/ton areia + 4,08E7 J/ton areia = 8,10E7 J/ton areia; Apêndice B) e os fatores de intensidade e pesos disponíveis na seção 2.4. Valor obtido do PAG direto de 6,18 kgCO<sub>2-eq./ton areia</sub>.

Tabela 2 (8,50E12 seJ/kg e 8,54E12 seJ/kg). Isso indica melhor eficiência no processo de obtenção de areia a partir de RCC comparado aos valores de referência, que representam a formação natural de areia e extração de areia do mar. Novamente, mantendo as devidas restrições, a areia reciclada estudada neste estudo apresenta maior eficiência global comparada a areia extraída do mar e a areia oriunda do ciclo natural.

Areia é oriunda do processo natural de desgaste das rochas, que em seguida podem se tornar arenitos pelo processo de sedimentação. Todo este processo faz parte dos ciclos sedimentares da biosfera. De acordo com Odum (1996), elementos da crosta terrestre surgem em processos paralelos do ciclo sedimentar, assim, toda a energia do ciclo sedimentar é dividida para formar os diferentes elementos da crosta (como xisto, calcário, argila do solo de xisto, carvão, mineral de ferro sedimentado, e bauxita), o que resulta em um mesmo Valor Unitário de Energia (UEV) para todos os elementos. Diferentemente, para o presente estudo da areia obtida a partir da reciclagem de RCC, é considerada a energia utilizada no transporte e nos processos da usina recicladora (incluindo as fases de implementação e operação), mas a energia do RCC é desconsiderada; essa abordagem é utilizada porque o RCC está sendo reciclado e sua UEV é zero (mais detalhes em Agostinho et al., 2013). Desta forma, o processo de reciclagem possui o benefício de não contabilizar (ou seja, “esquecer”) a energia previamente utilizada para tornar disponível o RCC, o que pode resultar – e neste estudo resultou – em melhor eficiência global para o sistema que considera reciclagem.

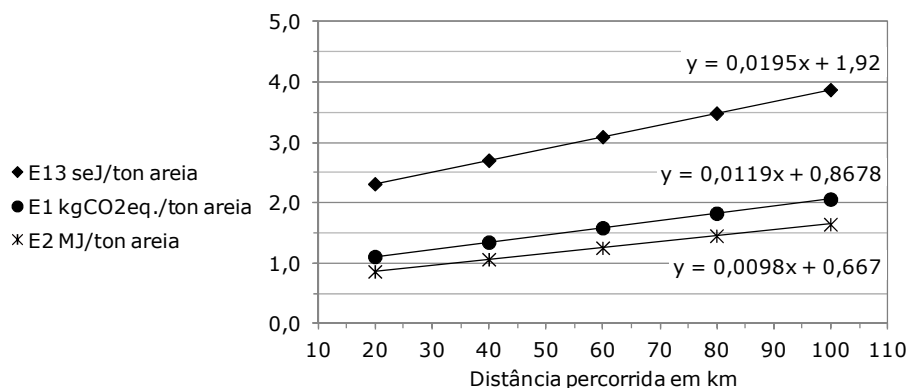
### 3.3. Potencial de aquecimento global (PAG)

A Tabela 1 mostra que o PAG indireto da areia reciclada a partir de RCC possui o valor de 9,64 kgCO<sub>2-eq.</sub>/ton areia, onde o item diesel novamente mostrou-se como o mais importante (40,9% na usina + 41,5% no transporte = 82,4% no total), seguido pela eletricidade (9,6%), óleo (4,1%) e aço (3,7%). Assim como nas duas abordagens metodológicas consideradas anteriormente (energia e emergência), uma pequena redução no uso de diesel poderia resultar em grandes reduções no PAG indireto; salienta-se que a produtividade deve ser mantida e/ou elevada. Considerando agora o PAG direto, ou seja, a quantidade de CO<sub>2-eq.</sub> emitido diretamente pelo sistema pela queima de combustível fóssil, o valor obtido foi de 6,18 kgCO<sub>2-eq.</sub>/ton areia (Tabela 2). As emissões diretas, usualmente consideradas nos estudos de emissões devido à sua fácil percepção (por exemplo, quando observa-se os gases de chaminé de uma indústria ou o escapamento de um veículo automotor), não chega a alcançar o valor do PAG indireto, o que mostra a importância em contabilizar as emissões indiretas quando avaliando o PAG total de qualquer sistema de produção. Através de uma análise comparativa, a Tabela 2 mostra que o PAG total obtido neste trabalho para a areia reciclada (0,016 kgCO<sub>2-eq.</sub>/kg areia) é inferior ao valor considerado como referência (0,034 kgCO<sub>2-eq.</sub>/kg areia). Mesmo que os valores de referência são característicos da produção/obtenção de areia partir de processos diferentes ao estudo neste trabalho e devem ser considerados com precaução, os resultados indicam que reciclar areia a partir de RCC causa menor potencial de aquecimento global comparado a areia de cascalho e natural. As diferenças podem ser ainda maiores se a etapa de transporte fosse considerada pelos valores de referência; apenas para ilustrar, a etapa de transporte atingiu 42% do PAG indireto da areia reciclada, o que aumentaria o PAG dos valores de referência.

### 3.4. Influência da etapa de transporte nos indicadores

Devido à influência que a etapa de transporte possui sobre os indicadores de eficiência energética, global, e PAG como mostrados na Tabela 1 (47,0%, 39,1% e 42,0% respectivamente), um estudo de cenário considerando diferentes distâncias percorridas na etapa de transporte mostra-se importante. O valor de referência considerado nos cálculos da Tabela 1 é de 60 km (veja Nota 11 do Apêndice B), estabelecido de acordo com informações levantadas *in situ* no sistema estudado — esta é a distância média geralmente considerada pela usina recicladora devido aos custos relacionados ao frete. A Fig. 3 mostra os valores obtidos para os três indicadores avaliados de acordo com as distâncias percorridas de 20km, 40km, 60km, 80km, e 100km. Como esperado, quanto maior a distância percorrida maior a demanda de recursos energéticos (diesel), de materiais (caminhão) e mão de obra (motorista), o que resulta em aumento dos três indicadores: eficiência energética, global, e PAG. As regressões lineares mostram diferentes coeficientes angulares, logo a distância considerada de transporte influencia de maneira diferente sobre cada indicador. O maior coeficiente angular obtido (0,0195) pela eficiência global indica que este aumentará a uma taxa maior comparado aos outros dois indicadores avaliados,

seguido pelo PAG (coeficiente angular de 0,0119) e pela eficiência energética (coeficiente angular de 0,0098). Isso acontece porque o aumento da energia demandada pelo sistema com o aumento da distância percorrida consome não somente mais diesel e aço como considerados pela análise de energia e PAG, mas também aumenta a mão de obra e serviços, itens que não são contabilizados pelas outras duas metodologias.



**Fig. 3.** Variação da energia total, energia incorporada, e potencial de aquecimento global na produção de 1 ton de areia reciclada considerando diferentes distâncias para transportar o resíduo da construção civil até a usina recicladora e a areia reciclada até o local de seu uso. A distância de 60 km é considerada como padrão nos cálculos da Tabela 1.

Interessante notar que, mesmo para a maior distância percorrida de 100 km como considerada na Fig. 3, o valor final dos indicadores de eficiência energética (164 MJ/ton areia), global (3,87E13 seJ/ton areia) e PAG (20,56 kgCO<sub>2</sub>-eq./ton areia) não superam os valores máximos de referência considerados na Tabela 2 (20-630 MJ/ton areia, 8,54E15 seJ/ton areia, e 34 kgCO<sub>2</sub>-eq./ton areia respectivamente). Isso indica que a areia reciclada estudada neste trabalho possui, a priori, melhor desempenho energético, global e PAG comparada a areia obtida a partir de cascalho em pedra e pelos processos tradicionais de extração (terra e mar).

#### 4. Conclusões

Considerando as abordagens metodológicas e o sistema avaliado neste estudo, pode-se concluir que:

(a) A eficiência energética, global, e o potencial de aquecimento global (PAG) da areia reciclada a partir de RCC (0,12 MJ/kg areia, 3,09E10 seJ/kg areia, e 0,016 kgCO<sub>2</sub>-eq./kg areia respectivamente) mostram melhor desempenho quando comparado aos valores considerados como referência (0,02-0,63 MJ/kg areia, 8,54E12 seJ/kg areia, e 0,034 kgCO<sub>2</sub>-eq./kg) — areia extraída de maneira tradicional, do oceano, e areia produzida a partir de cascalho em pedra;

(b) A etapa de transporte mostrou ter relevância nos indicadores calculados, pois considerando a variação de 20 a 100 km de distância percorrida (transporte do RCC até a usina recicladora e da areia reciclada até o usuário final) resulta na variação da influência de 6,3-24,8% do total da eficiência energética, 5,4-22,1% da eficiência global, e 5,2-21,4% do PAG.

Conclusões sobre qual sistema de produção de areia (reciclado vs. tradicional/extração natural) possui melhor desempenho energético e ambiental não podem ser feitas neste momento devido a falta de indicadores de eficiência energética, global, e PAG para o sistema de produção de areia tradicional. Os valores considerados neste trabalho para efeito de comparação (Tabela 2) devem ser considerados com cautela, pois representam sistemas de produção diferentes e possuem diferentes escalas de análise (isto é, janela de atenção ou volume de controle) comparada à areia reciclada aqui estudada. Desta forma, como próxima etapa pretende-se avaliar sistemas de produção de areia tradicional considerando a mesma abordagem metodológica utilizada neste presente estudo. Somente após a conclusão desta próxima etapa se poderá discutir com mais propriedade científica os prós e contras da areia reciclada comparada a areia tradicional sob uma perspectiva energético-ambiental.



## Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro da Vice-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade Paulista (UNIP). Agradecem também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq; Processo no.126053/2014-6) pela bolsa de Iniciação Científica concedida a Rogério F.M. Borges. A colaboração da empresa URBEM Tecnologia Ambiental no fornecimento de dados primários também é reconhecida.

## Referências

- Agostinho, F., Almeida, C.M.V.B., Bonilla, S.H., Sacomano, J.B., Giannetti, B.F., 2013. Urban solid waste plant treatment in Brazil: is there a net energy yield on the recovered materials? *Resources, Conservation and Recycling* 73, 143-155.
- Bargigli, S., Ulgiati, S., 2003. Energy and life cycle assessment of steel production. In: *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Biennial Energy Conference*. Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL, USA.
- Bonilla, S.H., Guarnetti, R.L., Almeida, C.M.V.B., Giannetti, B.F., 2010. Sustainability assessment of a giant bamboo plantation in Brazil: exploring the influence of labor, time and space. *Journal of Cleaner Production* 18, 83-91.
- Boustead, I., Hancock, G.F., 1979. *Handbook of Industrial Energy Analysis*. Ellis Horwood Publ., England, 422 pp.
- BRASIL, 2010. Lei n. 12.305 de 2 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em 05/11/2013.
- BRASIL, 2012. Departamento Nacional de Produção Mineral, Sumário Mineral, vol. 32, Área para construção civil. Disponível em <[https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7366](https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7366)>. Acesso em 05/11/2013.
- Brown, M.T., Protano, G., Ulgiati, S., 2011. Assessing geobiosphere work of generating global reserves of coal, crude oil, and natural gas. *Ecological Modelling* 222, 879-887.
- Buenfil, A.A., 2000. Sustainable use of potable water in Florida: an energy analysis of water supply and treatment alternatives. In: *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Biennial energy analysis research conference*. Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL, USA.
- Cachim, P.B., 2009. Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials* 23, 1292-1297.
- Coelho, A., Brito, J. de., 2013. Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – Part I: energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions. *Waste Management* 33, 1258-1267.
- CONAMA. Resolução n.307 de 5 Julho 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em 05/11/2013.
- DNPM, 2010. Departamento Nacional de Produção Mineral, Anuário Mineral Brasileiro 2010, Parte II Estatística Unidades da Federação.
- Figueiredo, S.S., Silva, C.G., Neves, G.A., 2011. Durabilidade de tijolos solo-cal incorporados com resíduos de demolição da construção civil. *Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, 64, 273-279.
- Jensen, A.A., Hoffman, L., Moller, B.T., Schmidt, A., Christiansen, K., Elkington, J., et al., 1997. Life cycle assessment: a guide to approaches, experiences and information sources. *Environmental Issues Series*, n 6. European Environment Agency. Disponível em <<http://www.eea.europa.eu/publications/GH-07-97-595-EN-C>>. Acesso em 27/11/2014.
- John, V.M., 2000. Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. Tese de Livre Docência, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 102p.
- Lintz, R.C.C., Jacintho, A.E.P.G.A., Pimentel, L.L., Gachet-Barbosa, L.A., 2012. Estudo do reaproveitamento de resíduos de construção em concretos empregados na fabricação de blocos. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* 5, 166-181.
- Moriconi, G., Corinaldesi, V., Antonucci, R., 2003. Environmentally-friendly mortars: a way to improve bond between mortar and brick. *Materials and Structures* 36, 702-708.
- Odum, H.T., 1996. *Environmental Accounting, Energy and Decision Making*. John Wiley & Sons INC, New York, 370 pp.
- Odum, H.T., 2000. Folio #2: Energy of Global Processes. *Handbook of Energy Evaluation*. Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL. Available at <<http://www.emergysystems.org/folios.php>>. Acesso em 15/09/2014.
- PNRS. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Ministério do Meio Ambiente. Versão preliminar para consulta pública, Setembro de 2011. Disponível em <[http://www.mma.gov.br/estruturas/253/\\_publicacao/253\\_publicacao\\_02022012041757.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_publicacao/253_publicacao_02022012041757.pdf)>. Acesso em 04/11/2013.
- Sinduscon, 2012. Resíduos da construção civil e o estado de São Paulo. Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo, Comitê de Meio Ambiente do Sinduscon-SP. Disponível em <[http://www.ambiente.sp.gov.br/cpla/files/2012/09/residuos\\_construcao\\_civil\\_sp.pdf](http://www.ambiente.sp.gov.br/cpla/files/2012/09/residuos_construcao_civil_sp.pdf)>. Acesso em 05/11/2013.
- Slesser, M., 1974. *Energy Analysis Workshop on Methodology and Conventions*. IFIAS, Stockholm, Sweden, 89 pp.

- Sweeney, S., M.J., Cohen, D.M., King, M.T., Brown. 2007. Creation of a Global Emery Database for Standardized National Emery Synthesis. In: Proceedings of the 4th Biennial Emery Research Conference, Gainesville, University of Florida. Disponível em <[http://sahel.ees.ufl.edu/frame\\_database\\_resources\\_test.php?search\\_type=basic&country=BRA](http://sahel.ees.ufl.edu/frame_database_resources_test.php?search_type=basic&country=BRA)>. Acesso em 30/06/2014.
- Tenório, J.J.L., Gomes, P.C.C., Rodrigues, C.C., Alencar, T.F.F.de., 2012. Concreto produzido com agregados reciclado. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais 5, 692-701.
- Thormark, C., 2001. Conservation of energy and natural resources by recycling building waste. Resources, Conservation and Recycling 33, 113-130.
- Ulgianti, S., Brown, M.T., 2002. Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions: the case of electricity production. Journal of Cleaner Production 10, 335-348.
- Ulsen, C., Kahn, H., Angulo, S.C., John, V.M., 2010. Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo. Revista Escola de Minas, Ouro Preto 63, 339-346.
- Ulsen, C., Kahn, H., Hawlitschek, G., Masini, E.A., Angulo, S.C., John, V.M., 2013. Production of recycled sand from construction and demolition waste. Construction and Building Materials 40, 1168-1173.
- USEPA, 2008. U.S. Environmental Protection Agency, Technology Transfer Network Clearinghouse for Inventories & Emissions Factors. Disponível em <<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html>>. Acesso em 15/06/2014.
- Yang, G., Kang, D., 2011. Emery evaluation of the marine sand extraction for aggregate supply for the construction of the Pusan New Port in Korea. KSCE Journal of Civil Engineering 15, 1005-1013.

### Apêndice A. Valores de intensidade de energia e unitários de emergia (UEV) considerados neste trabalho

Item	Unidade	Intensidade de energia em MJ/Unid. <sup>a</sup>	UEV <sup>b</sup>		PAG em kgCO <sub>2-eg</sub> /Unid. <sup>a</sup>
			seJ/Unid.	Ref.	
RCC <sup>c</sup>	kg	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Diesel	J	1,43E-6	1,81E05	d	9,81E-8
Óleo	J	1,43E-6	1,81E05	d	9,81E-8
Aço	kg	46,8	3,16E12	e	5,28
Eletricidade	J	1,58E-8	6,23E04	f	7,04E-8
Água	L	2,02E-3	3,76E09	g	1,62E-4
Mão de obra	h	n.a.	1,19E13	h	n.a.
Serviços	USD	n.a.	3,40E12	i	n.a.

n.a. = não aplicável; <sup>a</sup> Intensidade de energia e Intensidade de Potencial de Aquecimento Global (PAG para 20 anos) obtido de Ecoinvent Database v3.1 2014 ([www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch)); Itens escolhidos: "diesel, burned in building machine, GLO"; "steel production, converter, chromium steel 18/8"; "electricity production, hydro, reservoir, tropical region, BR"; "tap water production, conventional with biological treatment, CA-QC"; <sup>b</sup> Todas as UEVs estão atualizadas para a linha base de 15.83E24 seJ/ano (Odum, 2000) e não contabilizam Mão de obra e Serviços; <sup>c</sup> RCC (resíduo da construção civil) não possui intensidade de energia e UEV, pois se trata de um recurso que está sendo reciclado e, portanto, seu custo energético baseia-se somente nas atividades de coleta e transporte. Coleta e transporte do RCC são considerados neste trabalho na forma de Diesel, Óleo, Aço (caminhões), Mão de obra, e Serviços; <sup>d</sup> Brown et al., 2011; <sup>e</sup> Bargigli e Ulgianti, 2003; <sup>f</sup> Ulgianti e Brown, 2002; <sup>g</sup> Buenfil, 2000; <sup>h</sup> UEV da Mão de obra = (Emergia do Brasil em 2008 de 5,50E24 seJ/ano de Sweeney et al., 2007) / (População do Brasil em 2008 de 2,00E8 pessoas de Sweeney et al., 2007 \* 8 h/pessoa/dia \* 287 dias/ano) = 1,19E13 seJ/h; <sup>i</sup> Sweeney et al., 2007 (para o Brasil em 2008)

### Apêndice B. Memorial de cálculo da Tabela 1

#### Usina Recicladora

Nota 1 (Resíduo da construção civil) – Quantidade = 92.160 ton RCC/ano. Valor médio de resíduo recebido e tratado pela usina recicladora (dado obtido in situ); Conversão = (ton RCC/ano) (1/31.888 ano/ton areia); Fluxo = 2,89 ton RCC/ton areia

Nota 2 (Mão de obra) – Número de funcionários = 10 pessoas (dado obtido in situ); Horas de trabalho por dia = 8 horas/dia/pessoa; Dias de trabalho por ano = 287 dias/ano (valor médio excluindo feriados e finais de semana); Conversão = (pessoas) (h/dia/pessoa) (dia/ano) (1/31.888 ano/ton areia); Fluxo = 0,72 h/ton areia

Nota 3 (Diesel) – Quantidade = 36.000 litros/ano (dado obtido in situ); Conversão = (L/ano) (0,85 kg/L) (10.000 kcal/kg) (4.186 J/kcal) (1/31.888 ano/ton areia); Fluxo = 4,02 E7 J/ton areia

Nota 4 (Óleo) – Quantidade = 3.600 litros/ano (dado obtido in situ); Conversão = (L/ano) (0,85 kg/L) (10.000 kcal/kg) (4.186 J/kcal) (1/31.888 ano/ton areia); Fluxo = 4,02 E6 J/ton areia

Nota 5 (Água) – Quantidade = 3.600.000 Litros/ano (dado obtido in situ); Conversão = (L/ano) (1/31.888 ano/ton areia); Fluxo = 112,89 L/ton areia

Nota 6 (Aço equipamentos) – Equipamentos: 1 britador de impacto com capacidade de 50 m<sup>3</sup>/hora (8,5 ton de peso), 3 pás carregadeiras com capacidade de 1 m<sup>3</sup> (11,78 ton de peso cada), 1 retroescavadeira com capacidade máxima de 1,5 m<sup>3</sup> (6,9 ton de peso), 1 peneira de grande porte pesando (4,7 ton de peso); Dados sobre tipo e quantidade de equipamentos obtidos in situ; Dados de peso dos equipamentos obtidos de

catálogos técnicos; Total de aço dos equipamentos = 55,44 ton; Vida útil dos equipamentos = 30 anos; Conversão = (ton) (1.000.000 g/ton) (1/30 1/ano) (1/31.888 ano/ton areia); Fluxo = 57,95 g/ton areia

Nota 7 (Eletricidade) – Quantidade = 117.367 kWh/ano (dado obtido in situ); Conversão = (kWh/ano) (3.6E6 J/kWh) (1/31.888 ano/ton areia); Fluxo = 1,32 E7 J/ton areia

Nota 8 (Serviços) – Custo eletricidade (0,28117 R\$/kWh \* 117.367 kWh/ano = 33.000 R\$/ano); Custo Diesel (2,361 R\$/L \* 36.000 L/ano = 84.996 R\$/ano); Custo óleo (11,95 R\$/L \* 3.600 L/ano = 43.020 R\$/ano); Custo água (0,00886 R\$/L \* 3.600.000 L/ano = 31.896 R\$/ano); Custo equipamentos (britador 350.000 R\$, pá carregadeira 100.000 R\$, retroescavadeira 90.000 R\$, peneira 30.000 R\$; Custos totais = 570.000 R\$; Vida útil = 30 anos; Conversão = (R\$) (1/30 1/ano) (1/2,50 USD/R\$) (1/31.888 ano/ton areia); Fluxo = 0,24 USD/ton areia

### **Transporte do Resíduo da Construção Civil**

Nota 9 (Mão de obra) – Quantidade = 5 pessoas dirigindo durante 1.707 h/ano (veja Nota 11) (1/31.888 ano/ton areia); Fluxo = 0,27 h/ton areia

Nota 10 (Diesel) – Quantidade = 8.535 h/ano (veja Nota 11); Conversão = (h/ano) (60 km/2h; veja Nota 11) (1/7 L/km) (0,85 kg/L) (10.000 kcal/kg) (4.186 J/kcal) (1/31.888 ano/ton areia); Fluxo = 4,08 E7 J/ton areia

Nota 11 (Aço caminhões) – Considerou-se que o caminhão percorre aproximadamente 30km (dado obtido in situ e considerando aspectos econômicos) para transportar o resíduo da construção civil (RCC) até a usina recicladora, e percorre mais 30km para levar o material reciclado. Estas distâncias, somadas, demandam aproximadamente 2 horas para serem percorridas a 30 km/h em média. As incertezas nesta estimativa são grandes e, por isso, considerou-se um estudo de cenários dentro do corpo do texto principal. Utilizou-se aqui uma abordagem de alocação para estimar o valor aproximado da quantidade de horas de caminhões que são utilizados no processo de transporte. Considerando a capacidade do caminhão de 21,6 ton<sub>RCC</sub>/caminhão, as 92.160 ton<sub>RCC</sub>/ano processadas necessitam de aproximadamente 4.267 caminhões/ano (se todo o material fosse transportado de uma só vez) ou 4.267 viagens/ano considerando um único caminhão. Considerando que o percurso demanda 2h/viagem, tem-se 8.534 h/ano de necessidade de caminhões. Porém, trabalhando 8 h/dia, 5 dias/semana, e 48 semanas/ano correspondem a 1.920 h/ano de trabalho máximo que 1 caminhão realiza, logo, as 8.534 h/ano necessárias demandam aproximadamente 5 caminhões, cada um trabalhando 1.707 h/ano. Considerando agora que um caminhão possui vida útil de 30 anos (ou 262.800 horas; =365dias\*24h/dia\*30anos), as 1.707 h/ano \* 30 anos (=51.210 h) correspondem a uma porcentagem de 19.5% da vida útil total do caminhão. Sabendo que o peso de um caminhão é aproximadamente 8,7 ton<sub>aço</sub>/caminhão e sua vida útil de 30 anos, a quantidade de aço dos caminhões realmente utilizada pela usina de reciclagem é de 0,28 ton<sub>aço</sub>/ano (= 8,7 ton<sub>aço</sub>/caminhão \* 1/30 1/ano \* 5 caminhões \* 0.195%) \* (1.000.000 g/ton) \* (1/31.888 ano/ton areia); Fluxo = 8,78 g/ton areia

Nota 12 (Serviços) – Custo caminhão (250.000 R\$/caminhão \* 5 caminhões \* 1/30 1/ano de vida útil \* 19,5% da vida útil realmente utilizada (veja Nota 11)) = 8.125 R\$/ano); Custo Diesel (2,361 R\$/L \* 36.578 L/ano (veja Nota 9) = 86.362 R\$/ano); Custos totais = 94.487 R\$/ano; Conversão = (R\$/ano) (1/2,50 USD/R\$) (1/31.888 ano/ton areia); Fluxo = 1,18 USD/ ton areia