

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE UNIDADE DE PEQUENO PORTE DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Laís Carlos Boaventura Santos¹
Luciano Matos Queiroz¹
*Viviana Maria Zanta¹

ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF A SMALL SCALE CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE RECYCLING FACILITY

Recibido el 14 de noviembre de 2017; Aceptado el 23 de agosto de 2018

Abstract

Small recycling facilities is one of the most attractive alternatives for valorization of construction and demolition waste (C&DW), mainly due to its size that makes possible the installation very close to the generating sources. The objective of this work was to evaluate the environmental performance of a small C&DW recycling unit installed in Feira de Santana city, Bahia state, Brazil. Environmental performance indicators were selected in the scientific literature and validated by groups of experts for the aspects of noise emission, particulate matter emission, water consumption, energy consumption, segregation and productivity of recycled material. The raw material consumption showed that the process allows the recovery of C&DW class A (concrete, mortar and ceramic materials) of 92 %. The segregation of C&DW class A was adequate and also important since losses were minimal (0.05%). Water consumption was insignificant and energy consumption was less than 1% of total energy consumption of the construction site. The values of noise emission met the legal standard of environmental noise emission of the surrounding area provided by the Brazilian Law. The emission of Total Suspended Particles (TSP) in one day of observation was 1,460 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. The results allow concluding that it is recommended the use of safety and personal protection equipment and other measures that minimize the emission of particulate matter.

Keywords: construction waste, environmental impacts, indicators, recycling.

¹ Departamento de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Brasil.

Autor correspondente: Departamento de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Rua Aristidis Novis, 2 – Federação, Salvador, Bahia. 40210-630. Brasil. Email: zanta@ufba.br

Resumo

A implantação de unidades de reciclagem de resíduos da construção civil (RCC) é uma das alternativas mais atrativas para a valorização desses resíduos, sobretudo aqueles classificados como classe A (concretos, argamassas, material cerâmico, dentre outros) pela legislação brasileira. As unidades de pequeno porte apresentam atrativo adicional, pois podem ser instaladas em diferentes locais, preferencialmente, próximas às fontes geradoras. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho ambiental de uma unidade de reciclagem de pequeno porte de resíduos da construção civil classe A (URPP-RCC classe A). Estabeleceram-se indicadores de desempenho ambiental selecionados na literatura e validados por grupos de especialistas para os aspectos emissão de ruído, emissão de material particulado, consumo de água, consumo de energia, grau de segregação do RCC classe A e produtividade de material reciclado. Os valores dos indicadores de consumo de insumos mostraram que o processo apresenta aproveitamento de RCC classe A de 92% e que segregação do RCC classe A é adequada, pois as perdas foram mínimas (0.05%). Não há consumo de água no processo e a demanda por energia representou menos de 1% do consumo total de energia da obra. Os valores encontrados para emissão de ruído atenderam ao padrão preconizado pela legislação brasileira de emissão de ruído ambiente da área de entorno. A emissão de Partículas Totais em Suspensão (PTS), em um dia de observação, foi de 1,460 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Os resultados permitem afirmar que é recomendável o uso de equipamentos de segurança e proteção individual e outras medidas que minimizem a emissão de material particulado.

Palavras chave: desempenho ambiental, indicadores, reciclagem, resíduos da construção civil.

Introdução

Os componentes dos resíduos da construção civil (RCC) são classificados em função do seu potencial de reaproveitamento, priorizando-se a não geração e opções que reduzam a geração como a reutilização e reciclagem (Brasil, 2002). Para que essas alternativas sejam adotadas corretamente, há necessidade de elaboração de planos de gestão e gerenciamento de RCC nas obras, como também, a existência de sistemas de mensuração para monitoramento contínuo das ações executadas (Brasil, 2010).

A reciclagem de RCC classe A (solo, concreto, argamassas e material cerâmico) baseia-se nos princípios da sustentabilidade e da ecoeficiência do setor da construção civil, processando resíduos que retornam como novos agregados ou agregados recicláveis para o ciclo produtivo, fomentando a prática de iniciativas previstas nos princípios da economia circular. A produção de agregados recicláveis diminui a extração de recursos naturais, contribui para a conservação dos biomas, reduz os custos para aquisição de matéria prima e de transporte. No entanto, de acordo com dados da ABRECON (2015), a estimativa de RCC classe A reciclado no Brasil é de, apenas, 21%.

Leite (2001), Jadovski (2005) e Duarte e Lima (2007), classificam unidades de reciclagem como sendo de primeira, segunda e terceira geração, que se diferenciam pelos diferentes processos e equipamentos utilizados para eliminação das impurezas dos RCC e, conseqüentemente, pelo produto reciclado gerado. Uma unidade de primeira geração possui, somente, dispositivos para

retirada de materiais metálicos, enquanto que as de terceira geração visa à remoção total de contaminantes dos resíduos.

Pinto e Gonzalez (2005) informam que a área de reciclagem de RCC inclui os processos de trituração e peneiramento dos resíduos de concreto, alvenaria, argamassa e outros para produção de agregados reciclados e sugerem a inclusão de áreas destinadas à trituração ou corte simples de madeira e solos. Na literatura científica, a maioria dos estudos sobre unidades de reciclagem de RCC e seu desempenho aplicam-se às instalações de médio e grande porte, que possuem mais de uma etapa de processamento e utilizam equipamentos que ocupam grandes espaços (Duarte e Lima 2007; Cunha, 2007; Carpenter *et al.*, 2012; Coelho e Brito 2012; Sobral, 2012; Coelho e Brito 2013).

Nos trabalhos como os de Evangelista *et al.* (2010) e Santos e Zanta (2016) são encontradas características de unidades de reciclagem de pequeno porte (URPP). Os autores assumiram que essa é uma alternativa de natureza descentralizada de valorização dos RCC classe A, sendo possível sua instalação próxima a fonte geradora ou em bacias de captação de pequenos geradores. Desse modo, ampliam-se os agentes da rede técnica de valorização dos RCC classe A, pois podem estar envolvidos na logística reversa, tanto o pequeno, quanto o grande gerador, empresas do setor varejista e o setor público (Santos *et al.*, 2015). Outras características assumidas são: capacidade de processamento de até $5.0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, área física ocupada de cerca de 100 m^2 , abrangendo espaços para armazenamento dos RCC classe A e agregados reciclados, para o equipamento móvel e circulação de até dois colaboradores (Santos, 2017).

Embora sejam amplamente conhecidos os benefícios da adoção dessa alternativa, a identificação de aspectos ambientais referentes à operação da URPP é pouco explorada. Um sistema de monitoramento baseado em indicadores permite a obtenção de várias informações, tornando-se, assim, uma ferramenta de gestão capaz de auxiliar na avaliação dos processos e indicar as etapas que devem ser aprimoradas. Portanto, indicadores de desempenho ambiental são úteis para se identificar o nível de atendimento ao conceito de ecoeficiência, entendido como a maior eficiência da utilização de recursos naturais, não geração ou minimização de resíduos possibilitando agregação de valor econômico e redução de danos ambientais (Campos e Melo, 2008; Tello e Ribeiro, 2012).

Ademais, o desempenho ambiental de uma URPP reflete na salubridade para os trabalhadores e para a vizinhança da área do entorno de influencia. Pinto e Silva (2006) identificaram e mediram condições de emissão de poeira e ruído de unidades de reciclagem de médio e grande porte. Esses autores observaram que as fontes emissoras foram: o equipamento de britagem, a movimentação de veículos e correias transportadoras. Na composição química do material particulado a sílica livre cristalizada ou quartzo foram os principais constituintes identificados.

Na pesquisa realizada em três unidades de reciclagem de RCC, Fernandes *et al.* (2015), com base na observação direta e entrevistas, verificaram as condições de saúde e segurança dos trabalhadores. Aproximadamente, 90% dos trabalhadores ligados à produção indicaram o controle do material particulado como a principal demanda por melhoria. Os autores também destacaram que, embora não tenha sido citada pelos trabalhadores, a emissão de ruído precisa ser controlada. Os autores consideraram que nos estudos de caso realizados, os equipamentos de proteção individual e as mantas acústicas podem ser suficientes para atenuar o problema.

Material e métodos

Descrição da URPP

A URPP foi instalada em área anexa à fonte geradora, um canteiro de obra para construção de vinte blocos de edifícios com quatro pavimentos, cujo método construtivo é a alvenaria estrutural com lajes pré-moldadas e instaladas por guindastes. A URPP localiza-se na cidade de Feira de Santana Bahia, Brasil (-12.264492S e -38.925995W). A fonte geradora encaminha para a URPP resíduos da construção civil classificados como classe A pela legislação brasileira, compostos prioritariamente, por solos, argamassa, concretos e materiais cerâmicos, e que podem ser utilizados para diversos fins na própria fonte geradora, comercializados ou doados (Brasil, 2002).

A Figura 1 mostra a baía de armazenamento de RCC classe A e a rampa de acesso ao equipamento triturador modelo Queixada® 200P, marca *VegeDry*®, além das etapas do processo de reciclagem na URPP: recepção, cominuição, transporte, britagem, seguido por peneiramento, geração de agregado miúdo e graúdo e armazenamento de agregado reciclado.

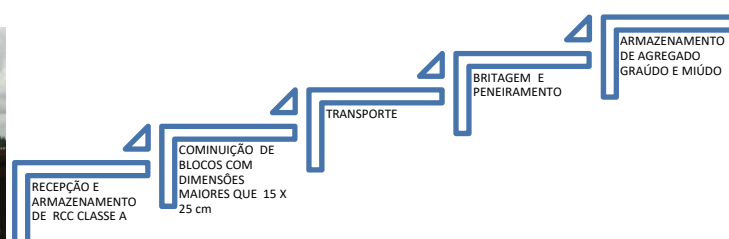


Figura 1. Vista das instalações da URPP e etapas do processo de reciclagem na URPP

Seleção de indicadores e obtenção de dados

A primeira etapa do trabalho consistiu na seleção de indicadores de desempenho ambiental da URPP. Os indicadores de desempenho ambiental relacionados ao gerenciamento de resíduos da construção civil e sua reciclagem foram levantados na literatura técnica científica com base nos critérios indicados na Tabela 1.

Tabela 1. Critérios para seleção de indicadores na literatura técnica científica

CRITÉRIOS DE SELEÇÃO	REFERÊNCIA
Coerência com o objeto de estudo	Von Sperling e Von Sperling, 2013
Viabilidade tecnológica, econômica e temporal para medir os desempenhos	FIRJAN, 2008
Facilidade de acesso aos dados primários	Von Sperling e Von Sperling, 2013
Confiabilidade da fonte de informação	Von Sperling e Von Sperling, 2013
Constituir indicador representativo de desempenho ambiental	MMA, 2014

Os indicadores selecionados na literatura foram submetidos à avaliação de especialistas componentes do Grupo de Pesquisa de Resíduos Sólidos e Efluentes da Universidade Federal da Bahia (GRSE), composto por dois docentes, engenheiros civis atuantes na área de saneamento, um pesquisador com doutorado e experiência na área de RCC e um especialista, engenheiro sanitário e ambiental, com experiência profissional e de pesquisa na área de gestão de resíduos sólidos, todos com experiência profissional superior a 10 anos. Os critérios de seleção utilizados foram: aderência às características de uma unidade de pequeno porte, indicadores de fácil obtenção em campo (disponibilidade, recursos técnicos e financeiros necessários). Identificando-se indicadores similares, os especialistas escolheram apenas um para avaliar a condição desse aspecto do processo de reciclagem. Todos os indicadores escolhidos foram aprovados em consenso por todos os especialistas.

Os indicadores selecionados foram submetidos, novamente, ao julgamento de mais quatro especialistas docentes, pesquisadores da área de resíduos sólidos, de diferentes universidades brasileiras, situadas no norte, nordeste, sul e sudeste do Brasil, pertencentes à Rede de Pesquisa Metodologias e Tecnologias para a Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos em Ambientes Urbanos (TECRESOL). A pergunta realizada foi: “os indicadores selecionados permitem a avaliação do desempenho ambiental de uma unidade de reciclagem de resíduos sólidos de pequeno porte?” A resposta, fornecida em reunião presencial, foi objetiva (sim ou não), sendo possível a inserção de comentários e sugestão de novos indicadores. Os indicadores com 50 % ou mais de aprovação foram selecionados.

A segunda etapa teve como objetivo verificar o grau de dificuldade de obtenção dos indicadores em campo. Realizou-se levantamento de dados obtidos por medições, observações e consultas aos responsáveis pelo envio de RCC classe A a URPP. Os dados de emissões de ruído e de material particulado foram levantados em campanhas com períodos curtos de monitoramento em função da limitação dos recursos financeiros necessários para a contratação de serviços especializados. Deve-se atentar para essa limitação quanto à generalização dos resultados, pois são pontuais e representativos de um momento da operação da URPP, embora permitam avaliar o desempenho da URPP que era o objetivo principal dessa pesquisa.

Para medição do nível de pressão sonora emitida pelo equipamento, utilizou-se o método e os valores de referência máximos aceitáveis de acordo com o uso da área de entorno indicados pela NBR 10151 (ABNT, 2000). Essa Norma Técnica estabelece para áreas mistas, predominantemente residenciais, que é o caso da área de estudo, limite aceitável do nível de ruído durante o dia igual a 55 dB. As medições de níveis de pressão sonora foram executadas com o equipamento: medidor integrador de pressão sonora, modelo LxT2[®], fabricado pela *Larson Davis*[®], classe de precisão 2, seguindo as condições gerais estabelecidas nas normas e legislação brasileiras. O ruído foi analisado nas faixas de frequências que variam de 20Hz - 20KHz, com a escala de compensação "A" e respostas de leitura rápida (*Fast*). Escolheram-se quatro pontos na URPP próximos a unidade, com as seguintes localizações: ponto A, localizou-se a 1.5 m do equipamento, ponto mais próximo da fonte sonora; ponto B, localizou-se a 4.8 m do equipamento, na área de armazenamento de RCC; ponto C que estava a uma distância de 4.2 m da fonte sonora e a uma distância de 2.0 m do limite do canteiro de obra e o ponto D que estava a 2.0 m do muro mais próximo das residências existentes no entorno.

Para cada ponto realizaram-se quatro medições, três com o equipamento em operação plena para se obter o nível de pressão sonora específica, e uma com o equipamento desligado, para se obter a pressão sonora gerada por sons intrusivos oriundos de outras fontes ou a pressão sonora de fundo. O tempo de medição foi escolhido de modo a permitir a caracterização do ruído. O equipamento reciclador emite um ruído contínuo quando ligado e esse som aumenta quando se colocam resíduos para britagem. Dessa maneira, a máquina possui ciclos próprios de emissão de ruído. Sendo assim, admitiu-se o tempo de medição igual a cinco minutos, com três medições por ponto para se calcular uma média aritmética. Para medição do ruído residual, admitiu-se o tempo igual a 15 minutos.

O método utilizado para medição dos níveis de emissão de material particulado foi estabelecido com base no trabalho de Campos (1995) e medido por equipamento impactador tipo cascata *Berner*, com amostrador de seis estágios de impactação com orifícios de diferentes diâmetros de abertura, acoplados a uma bomba a vácuo. Os estágios (1 a 6) foram utilizados para reter partículas em membrana da marca Millipore[®]. As aberturas dos orifícios dos estágios do impactador são: 0.06 µm; 0.18 µm; 0.5 µm; 1.7 µm; 4.9 µm; e 14.9 µm. Nos diferentes estágios,

o material particulado de diâmetro compatível com a abertura do equipamento ficou retido nos filtros inseridos no equipamento cujos pesos foram obtidos em triplicata antes e depois das amostragens “*in loco*”, para se determinar a quantidade de material particulado retido. O período amostral foi de três dias não consecutivos com o equipamento operando e um dia com o equipamento desligado. O tempo de amostragem em cada um dos dias foi igual a seis horas que é o tempo equivalente a operação do equipamento. O rotâmetro foi utilizado para medir o fluxo (ψ) do ar que entrava pelo impactador. O fluxo adequado é próximo de $1,100 \text{ L.h}^{-1}$. Utilizou-se balança de precisão eletrônica, modelo M214A[®] da marca *Bel Engineering*[®].

Os resultados obtidos foram comparados com os padrões preconizados na Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) 003 (Brasil, 1990). Essa Resolução utiliza o valor da concentração média anual dos valores coletados em um período de 24h para estabelecer limites de concentração de Partículas Totais em Suspensão (PTS) e de Partículas Inaláveis ou Material Particulado com dimensões inferiores a $10\mu\text{m}$ (MP10). Para padrões primários de qualidade do ar, a legislação estabelece um limite igual a $240 \mu\text{g.m}^{-3}$ de ar de PTS e $150 \mu\text{g.m}^{-3}$ de ar de MP10. Esses valores não podem ser excedidos mais de uma vez por ano. Nessa pesquisa, assumiu-se que o tempo de amostragem equivalente a operação da URPP correspondesse ao intervalo de 24 horas.

Para a determinação do grau de segregação dos RCC classe A, coletaram-se três amostras em duplicata, em três lotes recebidos na URPP. Para compor essas amostras, coletaram-se quatro alíquotas de diferentes pontos (base, meio e topo) da pilha de RCC classe A. Essas alíquotas foram dispostas sobre uma lona plástica, misturadas e quarteadas, sendo desprezadas duas partes até a amostra final preencher um recipiente de volume igual a 40 Litros.

Resultados e discussão

A Tabela 2 relaciona os quarenta e oito indicadores classificados nas categorias: insumo, emissões, benefícios, controle ambiental e infraestrutura encontrados na literatura científica. Considerou-se que a maior parte dos indicadores aderiu ao objeto de estudo e ao propósito de representação de desempenho ambiental da URPP. Dentre esses quarenta e oito indicadores, o primeiro grupo de especialistas pertencentes aos GRSE selecionou cinco que estão destacados e escritos em itálico na Tabela 2. O indicador (1) foi alterado para produtividade de produção de Agregado Reciclado (AGR), mensurada pela razão entre a quantidade de AGR pela quantidade de RCC classe A recebida, ou seja, de matéria prima. Os indicadores (4) e (10) foram utilizados para compor os indicadores consumo de energia em relação ao consumo total de energia da obra e por consumo de água mensal, respectivamente. Na segunda rodada de avaliação, após a apreciação do grupo de especialistas da rede TECRESOL, manteve-se os cinco indicadores selecionados e incluiu-se um novo indicador, denominado grau de segregação de RCC A recebido. Consensualmente, todos concordaram que a qualidade da matéria prima influencia a produtividade da URPP.

Tabela 2. Indicadores de desempenho ambiental selecionados na literatura e análise do grupo de especialistas GRSE

Categoria	Indicador e unidade	Indicadores similares	Aderência*
Insumos	1. <u>Consumo de matéria prima por unidade de produto/ t/t^(b)</u>	(1); (12); (13); (15); (16)	✓
	2. Consumo de energia / na ^(c)	(2); (3); (4)	✓
	3. Consumo de energia/ Watts ^(a)	(2); (3); (4)	✓
	4. <u>Consumo total de energia/ kWh^(b)</u>	(2); (3); (4)	✓
	5. Consumo de energia por unidade de produto/ kWh.t ⁻¹ (b)	(5); (6)	✓
	6. Quantidade de energia utilizada por ano ou por unidade de produto/ na ^(d)	(5); (6)	✓
	7. Percentual de uso de energia de fontes renováveis em relação ao consumo total de energia./ na ^(b)		
	8. Consumo de energia primária/ na ^(e)	(2); (3); (4)	✓
	9. Percentual de água reusada e reciclada com relação ao consumo total de água ^(b)		✓
	10. <u>Consumo total de água/ m³/na^(b)</u>	(10); (11)	✓
	11. Consumo de água por unidade de produto / m ³ .t ⁻¹ (b)	(10); (11)	✓
Emissões	12. Quantidade de resíduos gerados por unidade de produto/ t/t ^(b)	(1); (12); (1); (15); (16)	✓
	13. Quantidade de resíduos gerados por ano ou por unidade de produto/ na ^(d) .	(1); (12); (1); (15); (16)	✓
	14. Quantidade de resíduos perigosos, recicláveis ou reutilizáveis produzidos por ano/na ^(d)	(1); (12); (1); (15); (16)	✓
	15. Quantidade de resíduos para disposição/ na ^(d)	(1); (12); (13); (15); (16)	✓
	16. Quantidade de material destinado para o aterro sanitário por unidade de produto/na ^(d)	(1); (12); (13); (15); (16)	✓
	17. Quantidade de emissões atmosféricas por unidade de produto/ m ³ .t ⁻¹ (b)	(17); (19); (20)	✓
	18. Potencial de aquecimento global em quantidade de CO ₂ equivalente/ T CO ₂ equiv. (b)	continua	
	19. Quantidade de emissões específicas por ano/ na ^(d)	(17); (10); (20)	✓
	20. Quantidade de emissões específicas por unidade de produto/ na ^(d)	(17); (19); (20)	✓
	21. Quantidade de emissões atmosféricas com potencial de depleção da camada de ozônio/ na ^(d)		
	22. Quantidade de emissões atmosféricas com potencial de mudança climática global ^(d)		
	23. Emissão de poluentes atmosféricos/ t ^(f)	(23); (25); (26); (27)	✓
	24. Emissão líquida de gases do efeito estufa (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O e outros) / t ^(f)		✓
	25. <u>Emissão de poeira/ na^(c)</u>	(23); (25); (26); (27)	✓
	26. Emissões atmosféricas/ na ^(g)		✓
	27. Poluentes atmosféricos prioritários/ na ^(g)		✓
	28. Emissão de gases/ na ^(c)	(23); (25); (26); (27)	✓
	29. Poluição do ar / na ^(h)	(23); (25); (26); (27)	✓
	30. Emissão de CO ₂ / na ^(e)	(18); (21); (22); (24); (30);(31)	✓
	31. Emissões de gases de efeito estufa/ na ^(g)		
	32. Média ponderada dos níveis de ruído no perímetro da instalação da unidade de reciclagem/na ^(d)	(32); (33); (34); (35)	✓
	33. Ruído medido em determinado local/ na ^(d)	(32); (33); (34); (35)	✓
	34. <u>Nível de emissão de ruído/ na^(c)</u>	(32); (33); (34); (35)	✓
	35. Emissão de ruído/ na ^(h)	(32); (33); (34); (35)	✓
	36. Quantidade de vibração emitida/ na ^(d)		
	37. Quantidade de energia desperdiçada, liberada para a atmosfera/ na ^(d)		
	38. Energia/ na ^(g)		
39. Metais nas emissões líquidas / na ^(g)			
Benefícios	40. Quantidade de RCC que deixou de ser destinada a aterros ou foi disposta irregularmente/m ³ /na ^(a)	(36); (37); (40); (41); (42)	✓
	41. Quantidade de RCC reciclado, compostado e aterrado/ na (i)	(36); (37); (40); (41); (42)	✓
	42. Emissões para o ar e para água que são evitadas das instalações de gerenciamento de resíduos/ na ⁽ⁱ⁾		✓
	43. Energia utilizada a partir de biomassa, nuclear, energias renováveis e combustíveis fósseis/na ⁽ⁱ⁾	continua	✓
Controle Ambiental e Estrutura física	44. Quantidade de material reciclado e reusado por unidade de produto/ t/t ^(b)		
	45. Quantidade de resíduos convertidos em material reciclável por ano/ na ^(d)	(1); (36); (37); (40); (41); (42)	
	46. Quantidade de agregado natural que deixou de ser consumido/ m ³ (a)	(36); (37); (40); (41); (42)	
	47. Existência de dispositivos de controle ambiental/ SIM/NÃO ⁽ⁱ⁾		
48. Quantidade de resíduos armazenados no local/ na ^(d) .			

*Aderência entendida como representatividade do indicador para URPP - RCC classe A, descentralizada, com capacidade de processamento de até 5.0 m³.h⁻¹, móvel. (na) Não definido na Referência Bibliográfica; (a) Evangelista, 2009; (b) Cardoso, 2004; (c) Conti *et al.*, 2014; (d) ABNT, 2004; (e) Coelho e Brito, 2013; (f) MMA, 2014; (g) Carpenter *et al.*, 2012; (h) Yuan, 2013; (i) Yeheyis *et al.*, 2012; (j) Simion *et al.*, 2013; (l) Fernandes, 2013.

A Figura 2 mostra os resultados da determinação de emissão de ruído pela URPP. Consta-se que o operador do equipamento foi exposto a uma pressão sonora de 82 dB. A NR 15 (Brasil, 1978), que estabelece limite de tolerância para ruídos contínuos ou intermitentes, aponta que para uma pressão sonora de 85 dB, a máxima exposição diária permissível é de oito horas.

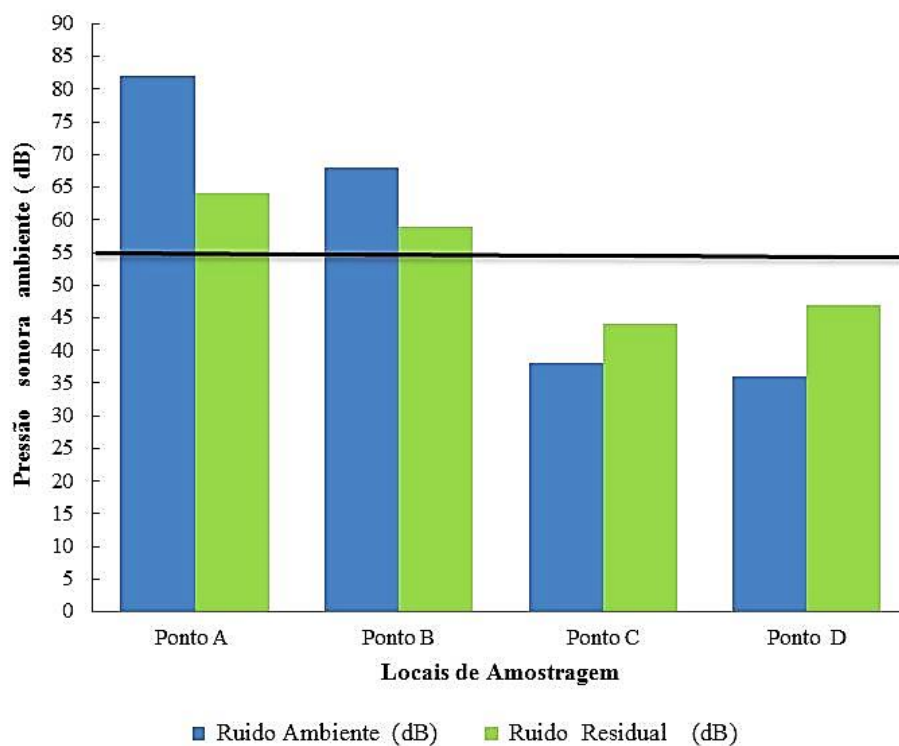


Figura 2. Valores medidos de ruído ambiente e ruído residual e valor máximo aceitável segundo a NBR 10151 (ABNT, 2000).

Como o número de medições realizadas foi pequeno, pode-se, apenas, estimar qual a dose diária de exposição do operador da URPP. No entanto, considerando o valor registrado nessa pesquisa, é recomendável o uso de equipamentos de proteção individual pelo operador. O ponto B, localizado um pouco mais afastado do equipamento apresentou o valor médio igual a 71 dB, mostrando uma atenuação da emissão sonora com o aumento da distância da fonte geradora. A localização dos pontos C e D, com valores médios medidos de 50 dB e 45 dB são inferiores ao valor de ruído ambiente para áreas residenciais mistas no período diurno (55 dB) indicado na NBR 10151 (ABNT, 2000). O valor médio de ruído residual oriundo da atividade da fonte geradora de reciclagem de RCC classe A foi igual a 54 dB.

Durante a operação da URPP ocorreu à emissão de Partículas Totais em Suspensão e de Partículas Inaláveis. A Figura 3 mostra a distribuição de valores de material particulado coletado em cada estágio do impactador para as amostras A1, A2, A3, com equipamento em funcionamento e A4, com equipamento desligado. As partículas grossas, com diâmetro acima ou igual a $4.9 \mu\text{m}$, representaram 69%. Por outro lado, as amostras de partículas inaláveis finas, menores que $1.7 \mu\text{m}$, representaram 19%. As demais, que correspondem a faixa de dimensões entre $1.7 \mu\text{m}$ e $4.9 \mu\text{m}$, representaram 13% do total.

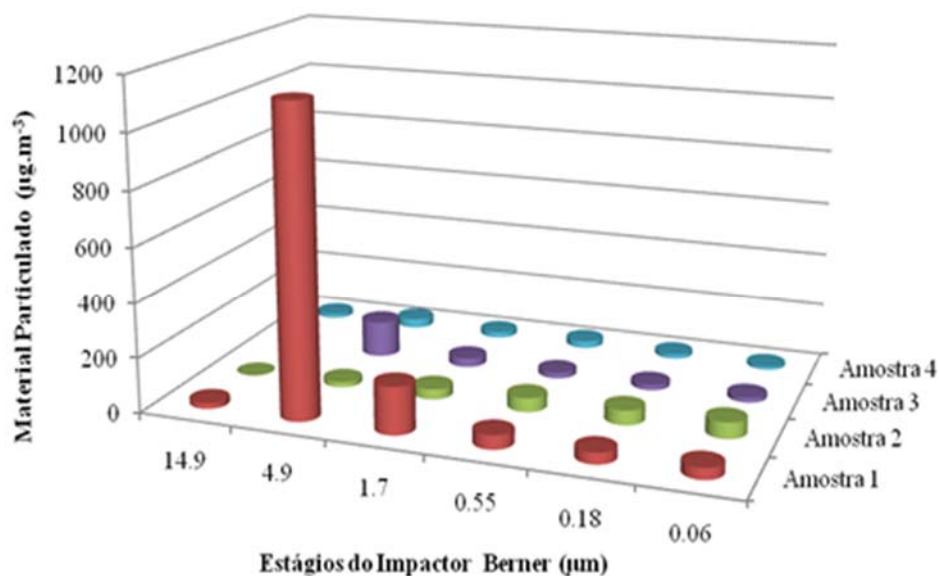


Figura 3. Valores de material particulado ($\mu\text{g.m}^{-3}$) coletados em cada estágio do impactador em cascata tipo *Berner* (amostra 1, 2 e 3 com equipamento funcionado e amostra 4 com equipamento desligado)

As partículas com diâmetro entre $14.9 \mu\text{m}$ e $4.9 \mu\text{m}$ predominaram na maioria das amostras. Os maiores valores verificados de Partículas Totais em Suspensão (PTS) e de MP10 foram iguais a $1,460 \mu\text{g.m}^{-3}$ e $1,439 \mu\text{g.m}^{-3}$, respectivamente. Registrou-se movimento mais intenso de descarga de RCC classe A nesses dias, o que pode ter favorecido a maior emissão de partículas. Esses valores ultrapassaram os limites determinados pela legislação brasileira (Brasil, 1990) e sugerem que cuidados devem ser tomados para reduzir a exposição do operador ao material particulado. Sabe-se que partículas inaláveis finas, menores que $10 \mu\text{m}$ (MP10), representam um fator de risco para o desenvolvimento e agravamento de doenças cardiovasculares e respiratórias (Araújo, 2014). Além do uso de equipamentos de segurança e proteção individual mencionados, medidas de controle ambiental devem ser tomadas para minimizar a emissão como a umidificação da área e uso de mantas acústicas.

Constatou-se que não ocorreu consumo significativo de água durante a operação da URPP ou manutenção de equipamentos. Durante o período de oito meses de observação, o consumo de energia para abastecimento da URPP variou entre 0.16 a 0.62% do consumo total da fonte geradora de RCC classe A.

O valor do indicador “Produtividade de Agregado Reciclado” obtido foi igual a 92%, o que representou uma perda percentual de 8% de RCC classe A durante o processo de reciclagem. Essa perda de produtividade no beneficiamento se deveu, em alguns momentos, a interrupção do processo e retorno de agregado reciclado acumulado na bica de saída para área de alimentação do equipamento. O grau de segregação do RCC classe A medido como grau de impurezas para o processo de reciclagem foi igual a 0.05%. Basicamente, essas impurezas são compostas por resíduos de madeira.

Conclusões

A revisão da literatura científica permitiu encontrar quarenta e oito indicadores aplicáveis para avaliação de desempenho ambiental de unidades de reciclagem de RCC de pequeno porte. Porém, o julgamento dos especialistas, considerando o grau de dificuldade de obtenção dos indicadores em campo, mostrou que somente cinco devem ser utilizados em unidades com capacidade de processamento de até $5.0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

A obtenção dos indicadores mostrou-se simples e de baixo custo para os indicadores representativos dos insumos (relações entre produção de agregado e matéria prima) e consumos (de água e energia). Utilizaram-se dados primários ou secundários, cuja rotina de coleta e registro demandou somente treinamento de pessoal da URPP para o adequado levantamento e registro.

Os indicadores relacionados à demanda por água e energia mostraram que a URPP apresentou baixo consumo. O consumo de energia da URPP correspondeu a menos de 1% do consumo total da obra de construção. Não houve consumo significativo de água na área da URPP. O grau de segregação dos RCC classe A foi de 0.05%, e a produtividade de material reciclado foi de 92%.

A qualidade da segregação do RCC classe A recebido, bem como o escoamento da produção de agregado reciclado são fatores que influenciam o desempenho ambiental em termos de geração de rejeitos do processo e aproveitamento de matéria prima.

Constataram-se valores pontuais de emissão de ruído (82 dB) acima do permitido na legislação brasileira para saúde do trabalhador. Quanto a emissão de material particulado, em um dia de coleta foram medidos valores de PTS igual a $1,460 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ e de MP10 igual a $1,439 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

No que se refere ao monitoramento de emissão de ruído e de material particulado foi necessário o uso recursos humanos e equipamentos especializados, o que em escala de rotina da unidade acrescenta custos ao processo como um todo, o que dificulta a obtenção dos dados para os indicadores. Por outro lado, essas informações são essenciais para subsidiar medidas de controle ambiental ou para determinar o impacto à saúde do trabalhador e para a vizinhança do entorno, principalmente se o local de instalação for uma área residencial.

Os valores dos indicadores obtidos mostraram que a URPP investigada tem potencial para ser uma alternativa ecoeficiente para emprego de forma descentralizada.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (Fapesb) e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo fornecimento de bolsas de fomento e apoio financeiro que tornaram possível a consecução desse trabalho.

Referencias bibliográficas

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2000) NBR 10.151: *Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento*. Rio de Janeiro, 4 pp.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) NBR 15.114: *Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação*. Rio de Janeiro, 7 pp.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) NBR 14.031: *Gestão Ambiental – Avaliação de Desempenho Ambiental – Diretrizes*. Rio de Janeiro, 38 pp.
- ABRECON, Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição (2015) *Relatório Pesquisa Setorial da Reciclagem de Resíduos da Construção 2014/2015 – A Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição no Brasil*. São Paulo.
- Araújo, I. P. S. (2014) *Metodologia para medição de material particulado em canteiros de obra*. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 180 pp.
- Brasil, CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente (1990) *Resolução CONAMA n° 003 - Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR*. Publicada no Diário Oficial da Republica Federativa do Brasil, Brasília, 22 de agosto de 1990. Acesso em de maio de 2018, disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>.
- Brasil, CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente (2002) Resolução CONAMA n° 307 - Diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, Publicada no Diário Oficial da Republica Federativa do Brasil, Brasília, 17 de julho de 2002. Acesso em de maio de 2018, disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/arquivos/36_09102008030504.pdf
- Brasil (2010) Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Publicada no Diário Oficial da Republica Federativa do Brasil, Seção 1, de 3 de agosto de 2010. Acesso em 25 de julho de 2019, disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm

- Brasil, Ministério do Trabalho (1978) Norma Regulamentadora NR 15 Anexo 1 –Limites de Tolerância para Ruído Contínuo ou Intermitente, Publicado pelo Ministério do Trabalho em 08 de junho de 1978, NR 15, Anexo 1, Acesso em 25 de julho de 2019, disponível em:
<http://trabalho.gov.br/seguranca-e-saude-no-trabalho/normatizacao/normas-regulamentadoras/norma-regulamentadora-n-15-atividades-e-operacoes-insalubres>
- Brasil, MMA - Ministério do Meio Ambiente (2014) Painel Nacional de Indicadores ambientais: Referencial teórico, composição e síntese dos indicadores da versão-piloto 2012. Secretaria Executiva, Departamento de Gestão Estratégica. Brasília.
- Campos, V. P. (1995) *Especiação Inorgânica de Enxofre, Nitrogênio e Cloro na Precipitação Seca e Úmida no Recôncavo Baiano*, Tese de doutorado, Química Analítica, Instituto de Química, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 135 pp.
- Campos, L. M. de S, Melo, D. A. de (2008) Indicadores de Desempenho dos Sistemas de Gestão Ambiental (SGA): uma pesquisa teórica, *Produção*, **18**(3), 540-555.
- Cardoso, L. M. F. (2004) *Indicadores de Produção Limpa: uma proposta para análise de relatórios ambientais de empresas*, Dissertação de mestrado, Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 155 pp.
- Carpenter, A., Jambeck, J. R., Gardner, K., Weitz, K. (2012) Life-Cycle Assessment and End-of-Life Management Options for Construction and Demolition Debris, *Journal of Industrial Ecology*, **17**(3), 396-406.
- Coelho, A., Brito, J. de. (2012) Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – part I: location, materials, technology and economic analysis, *Journal of cleaner production*. **39**, 338-352.
- Coelho, A, Brito, J. de. (2013) Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – Part I: Energy consumption and CO₂ emissions, *Waste Management*, **33**, 1258-1267.
- Conti, M.A, Riske, L.D., Puhk, R.H., Bedendo Jr., E. Daronco, G.C. (2014) Estudos dos benefícios e impactos da reciclagem dos Resíduos da Construção Civil, *XIX Jornada de Pesquisa* Universidade Regional UNIJUI Rio Grande do Sul.
- Cunha, N. A. (2007) *Resíduos da Construção Civil – Análise de Usinas de Reciclagem*. Dissertação de mestrado Programa de Pós-Graduação em Edificações da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 166 pp.
- Duarte, P., Lima, V. L. de. (2007) Beneficiamento do resíduo de construção. In: *II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica*, Anais do II CONNEPI, João Pessoa, Paraíba.
- Evangelista, P. P. de A., Costa, D. B, Zanta, V. M. (2010) Alternativa sustentável para destinação de resíduos classe A: sistemática para reciclagem em canteiro de obras, *Revista Ambiente Construído*, **10**(3), 23-40.
- Fernandes, M. P.M., Silva Filho, L.C. (2015) Segurança do trabalho no beneficiamento de RCC inerte, *Revista Ambiente Construído*, **15**(2), 113-126.
- Fernandes, M. P. M. (2013) *Apreciação de Boas Práticas visando a geração de um modelo de para a gestão municipal de resíduos da construção civil*, Tese de doutorado, PPEC – UFRGS, 264 pp.
- FIRJAN, Federação das Indústrias do Rio de Janeiro (2008) *Manual de indicadores ambientais*, Rio de Janeiro: DIM/GTM, 20 pp.
- Jadovski, I. (2005) *Diretrizes Técnicas e Econômicas para Usinas de Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição*, Dissertação de mestrado, Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 180 pp
- Leite, M. B. (2001) *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 270 pp.

- Pinto, T. C. N. O., Silva, M. C. E. S. P. (2006) *Riscos à Saúde dos Trabalhadores nos Processos Brasileiros de Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição*. Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho (Fundacentro), São Paulo. Acesso em 25 de julho de 2019, disponível em: <http://docplayer.com.br/10726653-Riscos-a-saude-dos-trabalhadores-nos-processos-brasileiros-de-reciclagem-de-residuos-de-construcao-e-demolicao.html>
- Pinto, T. de P., Gonzalez, J. L. (Coord.) (2005) *Manejo e gestão de resíduos da construção civil*, Brasília: Caixa Econômica Federal.
- Santos, L.C.B. (2017) *Análise do desempenho de uma unidade de reciclagem de pequeno porte de resíduos da construção civil*. Dissertação de mestrado, Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, 193 pp.
- Santos, L. C. B., Zanta, V. M. (2016) Caracterização dos resíduos da construção civil para reciclagem de pequeno porte, *Anais 17º Silubesa – Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Florianópolis/SC,
- Santos, L. C. B., Zanta, V. M, Lima, J. A. R. (2015) Rede Técnica dos resíduos da construção civil em Salvador, Bahia e a Política Estadual de Resíduos Sólidos da Bahia, *Anais 28º CBESA – Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro/RJ.
- Sperling, T. L. von, Sperling, M. von. (2013) Proposição de um sistema de indicadores de desempenho para avaliação de qualidade dos serviços de esgotamento sanitário, *Engenharia Sanitária Ambiental*, **18**(4), 313-322.
- Sobral, R. F. D. (2012) *Viabilidade econômica de usina de reciclagem de resíduos da construção civil: estudo de caso da USIBEN* – João Pessoa-PB. Dissertação de mestrado – UFPB/CT. João Pessoa, 114 pp.
- Tello, R., Ribeiro, F. B. (2012) *Guia CBIC de boas práticas em sustentabilidade na indústria da Construção*. Brasília: Câmara Brasileira da Indústria da Construção; Serviço Social da Indústria; Nova Lima: Fundação Dom Cabral.
- Yuan, H. (2013) Key indicators for assessing the effectiveness of waste management in construction projects, *Ecological Indicators*, **24**, 476-484.
- Yeheyis, M., Hewage, K., Alam, M. S., Eskicioglu, C., Sadiq, R. (2012) An overview of construction and demolition waste management in Canada: a lifecycle analyses approach sustainability, *Clean Techn Environ Policy*, **15**, 81-91.