



Encontro Internacional sobre Gestão
Empresarial e Meio Ambiente

Ecoeficiência ambiental de empresas termelétricas: uma proposta de como medir

MARIO ROBERTO DOS SANTOS

Universidade Nove de Julho - Uninove
mario.rsantos@terra.com.br

CLÁUDIA ECHEVENGUÁ TEIXEIRA

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, IPT
ceteixeira10@gmail.com

CLÁUDIA TEREZINHA KNISS

Universidade Nove de Julho - Uninove
kniesscl@yahoo.com.br

Ecoeficiência ambiental de empresas termelétricas: uma proposta de como medir

Resumo

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a valorização de cinzas pesadas, proveniente da combustão de carvão mineral em usinas termelétricas, como matéria-prima alternativa em substituição da areia industrial na produção de materiais cerâmicos e também na substituição do clínquer na produção de cimento Portland, como uma abordagem de ecoeficiência em termelétricas. A avaliação foi realizada conforme a norma ABNT NBR ISO 14045 que orienta que os impactos ambientais devem ser avaliados por meio da utilização da ACV. A pesquisa utilizou o método ReCiPe *endpoint* pontuação única, para o cálculo dos impactos ambientais e foi avaliada por meio do *software* SimaPro 8.0. Os resultados mostraram que a ecoeficiência relativa da geração de cinzas pesadas para uso na indústria de revestimentos cerâmicos comparada com a geração de cinzas pela termelétrica dispostas nas lagoas, a ecoeficiência da termelétrica passaria de 0,2% inferior para 0,97% superior. A ecoeficiência relativa da geração de cinzas pesadas para uso na indústria de cimento comparada com a geração de cinzas pela termelétrica dispostas nas lagoas, a ecoeficiência da termelétrica passaria de 1% inferior para valores variando de 2,4% a 11,5%. Portanto o uso das cinzas pesadas como matéria-prima alternativa poderá melhorar a ecoeficiência das empresas termelétricas.

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida (ACV). Carvão mineral. Cinzas pesadas. Ecoeficiência. Usina termelétrica.

Thermal power plant environmental eco-efficiency: a proposal for how to measure

Abstract

The aim of this study was to evaluate the valuation of bottom ash from the coal combustion in power plants as an alternative raw material in replacement industrial sand in the production of ceramic materials and the replacement of clinker in cement production Portland, as one eco-efficiency approach for power plants. The evaluation was conducted according to ISO 14045 standard that guides the environmental impacts should be evaluated using LCA. The research used the recipe method endpoint single score for the calculation of environmental impacts and was evaluated using the SimaPro 8.0 software. The results showed that the relative eco-efficiency of the generation of bottom ash for use in the ceramic industry compared with the generation of ash by thermal disposed in ponds, eco-efficiency thermoelectric would increase from 0.2% down to 0.97% higher. Eco-efficiency on the generation of bottom ash for use in the cement industry compared with the generation of ash by thermal disposed in ponds, eco-efficiency thermoelectric go from 1% down to values ranging from 2.4% to 11.5%. Therefore, the use of bottom ash as an alternative raw material can improve the eco-efficiency of thermal power plants.

Key Words: Life cycle assessment (LCA). Mineral coal. Bottom ash. Eco-efficiency. Thermal power plant.

1 Introdução

Durante décadas, a abordagem das questões ambientais limitava-se a proteger e tentar restaurar o dano ao meio ambiente depois de ocasionado (Blengini, 2008). No entanto, desde meados dos anos 1990, a abordagem da gestão de resíduos, aos poucos, deixou de ser no final dos processos industriais (“fim de tubo”) para considerar os produtos com valor econômico negativo e que, conseqüentemente, precisam ser evitados (Giannetti & Almeida, 2006). Essa abordagem, pautada no conceito de ecologia industrial, no qual o sistema industrial não é visto isoladamente dos sistemas vizinhos, mas em conjunto com eles (Jelinski, Graedel, Laudise, McCall, & Patel, 1992), considera a necessidade de gerenciar e controlar ao longo do ciclo de vida e vislumbra a não geração de resíduos, a qualidade ambiental dos processos, bem como a oferta de “produtos sustentáveis” (Manzini & Vezzoli, 2008) ou, de um modo mais amplo, a gestão de cadeia de suprimentos verde (GCSV).

Srivastava (2007) definiu uma classificação da gestão da cadeia de suprimentos verde, considerando a importância da cadeia, o *green design* de produto e as operações verdes (manufatura e remanufatura, logística reversa e gestão de resíduos). Desta forma, o conceito de cadeia de suprimento verde integra o pensamento ambiental, incluindo o *design* de produto, fontes e seleção de materiais, manufatura, entrega do produto final aos consumidores, bem como gestão do produto após sua vida útil.

A inserção desses métodos e técnicas, tais como logística reversa, avaliação de ciclo de vida (ACV), reciclagem, remanufatura, entre outras, transforma as cadeias produtivas antes vistas como lineares, em ciclos quase inteiramente fechados, aproximando-se dos fluxos de materiais e energia encontrados na natureza. É conhecida como cadeia de suprimento (CS) em circuito fechado e integra, total ou parcialmente, tanto os fluxos principais quanto os reversos, de modo que os materiais retornados recebam processamento dentro da própria cadeia (Carvalho & Barbieri, 2010).

Quando a geração de resíduos é inevitável nos processos industriais e no ciclo de vida dos produtos eles devem ser introduzidos em novos ciclos produtivos, evitando o descarte na natureza (Bautista-Lazo & Short, 2013).

A crescente demanda de sistemas seguros de disposição final tem estimulado o estudo de alternativas tecnológicas e econômicas para que resíduos possam ser introduzidos como matéria-prima, carga e agregados em outros ciclos de produção. Dessa maneira, é possível diminuir os custos de tratamento e disposição final, além de oferecer matéria-prima secundária ao mercado (Teixeira, 2001; Tonini & Astrup, 2012).

Quando a origem e as características dos resíduos são conhecidas, sua incorporação no processo produtivo torna-se atraente no desenvolvimento de novos produtos com propriedades de interesse tecnológico (Zanchet et al., 2007). Alguns aspectos referentes à introdução desses resíduos precisam ser estudados e compreendidos, para que a quantidade de resíduo adicionada seja tecnicamente viável e o produto final obtido possa ter um desempenho técnico semelhante ao obtido com a matéria-prima convencional (Chowdhury, Apul, & Fry, 2010; Liang & Zhang, 2012; Merrild, Larsen, & Christensen, 2012).

Dentro dos resíduos industriais de origem conhecida encontram-se os resíduos gerados pela combustão de carvão mineral nas termelétricas, sendo que o Brasil possui parte de sua matriz energética oriunda dessas usinas.

Os principais impactos ambientais produzidos durante o beneficiamento do carvão mineral decorrem da disposição de resíduos sólidos e rejeitos, sem valor comercial e depositados em áreas próximas ao local de utilização (Fungaro & Izidoro, 2006). As emissões para o ar originárias da combustão do carvão e seus impactos associados ao meio ambiente e a saúde humana têm sido historicamente a principal causa de preocupação com o uso de carvão para geração de energia elétrica (Babbitt & Lindner, 2005). A cinza pesada originária do

processo de combustão do carvão é depositada a céu aberto, em bacias de sedimentação e carece de aplicações industriais (Kniess et al., 2011).

Nesse contexto, apresenta-se o problema desta pesquisa: a valorização de resíduos como uma abordagem de ecoeficiência em termelétricas, considerando como unidade de análise as cinzas pesadas de carvão mineral, como agregado na produção de artefatos cerâmicos e substituto do clínquer na produção do cimento.

A valorização é um termo amplo que engloba diferentes oportunidades de agregar valor econômico aos resíduos. São considerados processos de valorização de resíduos a reciclagem, a compostagem, o aproveitamento energético de aterros e o co-processamento de resíduos industriais, entre outros. Segundo Paulli (1995, como citado em Teixeira, 2001) valorização de resíduos é um conceito no qual os resíduos são considerados como fonte de matéria-prima para um novo ciclo de produção.

De acordo com o problema apresentado, tem-se a seguinte questão de pesquisa:

Como medir a ecoeficiência ambiental das empresas, quando valorizam seus resíduos sólidos industriais ao destiná-los como matéria-prima alternativa para outros setores indústrias?

Este trabalho está delineado da seguinte forma: após essa breve introdução, na seção dois apresenta-se a revisão da literatura, na seção três os procedimentos metodológicos de pesquisa empregados, na seção quatro os resultados e na seção cinco as conclusões.

2 Revisão da literatura

Nesta seção serão apresentados gestão de resíduos, ecoeficiência segundo a norma ABNT 14045 e as cinzas pesadas de carvão mineral objeto do estudo.

2.1 Gestão de resíduos

O objetivo de reduzir o impacto ambiental da atividade industrial é amplamente aceito como uma meta a ser alcançada. Na fabricação, essas práticas de negócios podem variar, desde a substituição de materiais não-biodegradáveis por biodegradáveis, reciclagem de produtos, até a redução, dentro das CS's, do consumo de energia e das emissões atmosféricas. A implementação dessas práticas empresariais é feita com maior profundidade quando a redução dos impactos ambientais está associada com o aumento dos lucros para o negócio como um todo (Hodge, Ochsendorf, & Fernández, 2010).

Benefícios ambientais significativos podem ser obtidos por meio de diferentes processos de gestão de resíduos, conforme preconizaram Ekvall, Assefa, Björklund, Eriksson e Finnveden (2007): (i) Incineração de resíduos com recuperação de energia reduz a necessidade de outras fontes de energia; (ii) Materiais provenientes de processos de reciclagem substituem a necessidade de produção de material virgem; (iii) Tratamento biológico pode reduzir a necessidade de produção de fertilizantes artificiais e combustíveis para veículos; (iv) Resíduos provenientes da incineração de resíduos podem substituir a brita na construção de estradas.

A disposição em aterros sanitários é um dos principais métodos de gestão de resíduos domiciliares e industriais nas últimas décadas em muitos países, o que tem gerado grandes problemas ambientais (Di Bella, Di Trapani, Mannina, & Viviani, 2012; Laner, Crest, Scharff, Morris, & Barlaz, 2012). Os aterros são considerados uma forma econômica e de baixo custo de armazenamento de resíduos (Masi, Caniani, Griego, Lioi, & Mancini, 2014). Mesmo alguns países altamente industrializados, tais como Estados Unidos da América, Austrália, Reino Unido e Finlândia têm uma dependência muito grande do uso de aterros (Laner et al., 2012).

Com o objetivo de minimizar o descarte de substâncias na natureza e também redução do consumo de recursos naturais, são gerados esforços no sentido de reintegrar os resíduos nos processos produtivos originais, seja por reciclagem, reuso, recuperação etc. e assim possibilitar uma redução dos passivos ambientais.

2.2 Ecoeficiência

Ecoeficiência é um instrumento para a análise da sustentabilidade e indica quanto a atividade econômica é eficiente e diz respeito a natureza dos bens e serviços frutos dessa atividade (Zhang, Bi, Fan, Yuan, & Ge, 2008).

Segundo Barbieri (2007, p. 138) “[...] a ecoeficiência baseia-se na ideia de que a redução de materiais e energia por unidade de produtos ou serviços aumenta a competitividade da empresa, ao mesmo tempo em que reduz as pressões sobre o meio ambiente, seja como fonte de recurso, seja como depósito de resíduos”. Já para Demajorovic (2010, p. 175) “[...] significa gerar mais produtos e serviços com menor uso dos recursos e diminuição da geração de resíduos e poluentes” e segundo a ABNT NBR ISO 14045 (2014, p.2) é o “[...] aspecto da sustentabilidade que relaciona o desempenho ambiental de um sistema de produto ao valor do sistema de produto”.

Em termos gerais, a ecoeficiência é uma filosofia de gestão empresarial que incentiva a empresa a procurar melhorias ambientais que resultem em benefícios econômicos (Bréchet & Li, 2013). Segundo Knight e Jenkis (2009), adotar uma abordagem de ecoeficiência é um modo pelo qual um processo produtivo industrial pode reduzir o impacto sobre o meio ambiente.

A metodologia de avaliação de ecoeficiência foi introduzida pela norma ISO 14045: *Environmental management – Eco-efficiency assessment of product systems – Principles, requirements and guidelines*, primeira edição de 15 de maio de 2012 (ISO 14045, 2012). A norma brasileira correspondente é a ABNT NBR ISO 14045: Gestão ambiental – Avaliação da ecoeficiência de sistemas de produto – Princípios, requisitos e orientações; primeira edição de 21 de maio de 2014 (ABNT, 2014). A avaliação de ecoeficiência é uma metodologia quantitativa de gestão que permite o estudo de impactos ambientais durante o ciclo de vida de um sistema de produto em conjunto com o valor do sistema de produto. O ciclo de vida do produto considera desde a extração da matéria-prima, passando por todas as suas fases, tais como manufatura, uso etc. até sua disposição final (ABNT, 2014).

A ecoeficiência, segundo a norma ABNT 14045 (2014) pode ser calculada pela fórmula:

$$\text{Ecoeficiência} = \frac{\text{Valor do produto}}{\text{Impacto ambiental}} \quad (\text{Equação 1})$$

A norma ABNT 14045 orienta também que, para a comparação da ecoeficiência entre produtos seja usada a fórmula:

$$\text{Fator} = \frac{\text{Ecoeficiência do produto avaliado}}{\text{Ecoeficiência do produto base}} \quad (\text{Equação 2})$$

A avaliação de ecoeficiência, objeto desta pesquisa, foi aplicada no processo de reutilização de cinzas pesadas, provenientes da combustão de carvão mineral para a geração de energia elétrica em uma usina termelétrica.

2.3 Cinzas pesadas de carvão mineral

Asokan, Saxena e Asolekar (2005), Babbitt e Lindner (2005), Ramadoss e Sundararajan (2014) entre outros, citaram que a poluição ambiental, causada pelo carvão utilizado em usinas térmicas e seus resíduos, é vista como uma das principais fontes de poluição, afetando o ambiente em termos de uso da terra, saúde humana, e do ar, solo e água e acarreta graves impactos ambientais. Portanto a valorização e reutilização desses resíduos tornou-se uma questão importante nas últimas décadas (Menéndez, Álvaro, Argiz, Parra, & Moragues, 2013).

A usina termelétrica pesquisada, gerou, em média, para cada 100 toneladas (t) de carvão mineral consumidas, 43 t de cinzas (43%), das quais 80% são extraídas secas e 20% úmidas. A umidade das cinzas pesadas é decorrente dos processos de extração e do manuseio, sendo, portanto, bastante variável, mas sempre de teor elevado (Kniess, 2005).

A proporção de cinzas geradas não é constante em todas as usinas termelétricas pois dependem da configuração e operação da caldeira (Babbitt & Lindner, 2005) e da origem e características do carvão mineral utilizado (Kniess, 2005).

A reciclagem de resíduos sólidos, por meio de sua incorporação em formulações cerâmicas para produção de cerâmicas tradicionais, tais como tijolos, telhas, revestimentos cerâmicos, porcelanas etc., tem atraído a atenção dos pesquisadores, em razão da possibilidade de aproveitamento de grandes quantidades de resíduos e pelos resultados técnicos que são apresentados na literatura (Campos, Menezes, Lisboa, Santana, & Neves, 2007).

Outro potencial uso para as cinzas pesadas é na indústria de cimento Portland (Oss & Padovani, 2003). Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2015) a produção de cimento passa pelas seguintes fases de processamento: extração da matéria-prima; britagem; moagem da mistura crua; homogeneização da mistura crua; calcinação (clinker); moagem do clínquer; e despacho do cimento.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O projeto foi desenvolvido por meio de um estudo de caso, pois segundo Yin (2010), questões de pesquisa “como” e “por que”, indicam, de forma relevante, uma relação com o método de pesquisa a ser utilizado, e é, provavelmente, o método mais apropriado. O estudo de caso único, foi realizado em uma empresa termelétrica, a Tractebel, localizada no município de Capivari de Baixo, Estado de Santa Catarina, é uma das maiores usinas geradoras de energia termelétrica por meio de combustão de carvão mineral do país, sendo assim, um caso representativo (Yin, 2010) no setor de geração de energia elétrica por combustão de carvão.

Os procedimentos metodológicos desta pesquisa foram realizados em três fases: (i) levantamento dos dados por meio de questionários e entrevistas em visitas à empresa em duas etapas; (ii) levantamento de dados secundários em teses, artigos de periódicos e base de dados do *software* SimaPro referentes aos inventários para a elaboração da ACV; (iii) avaliação dos dados.

Uma pesquisa exploratória quantitativa foi realizada e dimensionou as emissões de poluentes para atmosfera, água e solo em termos numéricos relativos ao processo produtivo de energia elétrica e seus resíduos, com o foco nas cinzas pesadas. Foram dimensionadas também todas as emissões de poluentes para atmosfera, água e solo em termos numéricos relativos ao processo produtivo de areia para revestimentos cerâmicos e de clínquer para a indústria de cimento Portland.

A avaliação da ecoeficiência dos processos de geração de cinzas de carvão mineral, de produção e extração de areia para a indústria de revestimentos cerâmicos e de produção de clínquer para a indústria de cimento Portland foram realizados e comparados com o objetivo de mostrar que as cinzas pesadas poderão ser utilizadas como matéria-prima alternativa tanto na produção de revestimentos cerâmicos como na produção de cimento Portland.

A avaliação foi realizada seguindo a norma ABNT NBR ISO 14045 (2014) que orienta que os impactos ambientais sejam avaliados com a utilização da ACV, conduzida em conformidade com as normas ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b).

3.1 Objetivo e escopo da ACV

A ACV avaliada teve três objetivos: (i) inventário das matérias-primas necessárias e das emissões de poluentes e sua associação com a produção dos resíduos gerados pela combustão de carvão, isto é as cinzas pesadas de carvão mineral; (ii) inventário das matérias-primas necessárias e das emissões de poluentes associado com a produção de areia destinada produção de revestimentos cerâmicos; e (iii) inventário das matérias-primas necessárias e das emissões

de poluentes associado com a produção dos resíduos gerados na produção do clínquer utilizado na fabricação de cimento Portland.

Foi considerado que a substituição tanto da areia industrial como de o clínquer por cinzas pesadas não interferirá nas propriedades dos revestimentos cerâmicos e do cimento Portland durante toda a sua vida útil, isto é, desde a sua fabricação até a sua disposição final.

O escopo da ACV incluiu:

- a) Produção das cinzas pesadas: mineração e preparação do carvão, transporte do carvão para a termelétrica, combustão do carvão, geração das cinzas pesadas, arraste hidráulico das cinzas para as lagoas e disposição nas lagoas da termelétrica;
- b) Produção das cinzas pesadas para substituição de areia industrial: mineração e preparação do carvão, transporte do carvão para a termelétrica, combustão do carvão, geração das cinzas pesadas, arraste hidráulico das cinzas para as lagoas, retirada da lagoa, secagem e transporte das cinzas até a indústria de revestimentos cerâmicos,
- c) Produção das cinzas pesadas para substituição de clínquer: mineração e preparação do carvão, transporte do carvão para a termelétrica, combustão do carvão, geração das cinzas pesadas, arraste hidráulico das cinzas para as lagoas, retirada da lagoa, secagem e transporte das cinzas até a indústria de cimentos Portland;
- d) Produção da areia: extração, produção e transporte até a indústria de produção de revestimentos cerâmicos,
- e) Produção de clínquer: extração das matérias-primas, transporte até a indústria de cimento Portland e produção do clínquer.

3.2 Limites do sistema

Os sistemas aqui considerados representam um processo típico de geração de energia por meio de carvão pulverizado e consequente produção de cinzas pesadas, produção de cerâmica e produção de cimento Portland. Os limites de cada estágio estão mostrados nas Figuras 1, 2 e 3 a seguir.

O sistema inclui o transporte das cinzas pesadas desde a usina geradora até o seu local de uso, a indústria de produção de revestimentos cerâmicos e uma empresa de produção de cimento. Aqui foi considerado o sistema do berço ao portão (*cradle to grave*), isto é, as cinzas transportadas até o portão das empresas.

A Figura 1, mostra os três cenários de cinzas considerados: o primeiro cenário com o ciclo de vida básico das cinzas pesadas de carvão mineral desde a extração do carvão mineral até a disposição nas lagoas; o segundo cenário incluindo secagem e transporte para uso na indústria de materiais cerâmicos, e o terceiro cenário incluindo secagem e transporte para uso na fabricação de cimentos Portland.

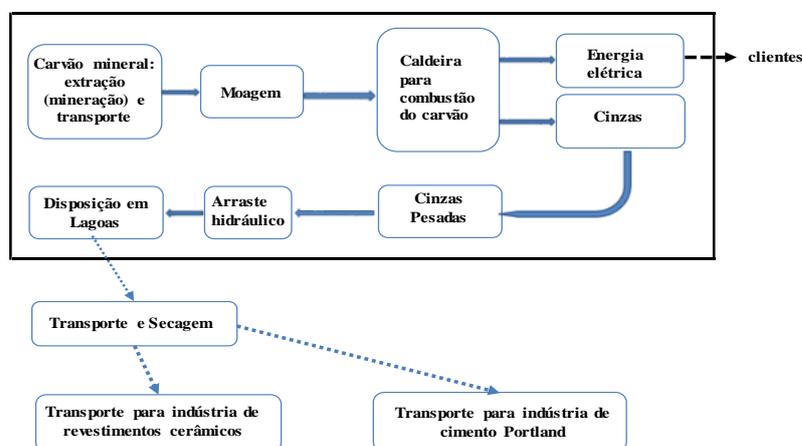


Figura 1 – Limites do sistema cinzas pesadas
Fonte: Adaptado de Kniess (2005).

A Figura 2 mostra os limites do processo produtivo da areia desde a extração até o transporte para a indústria de revestimentos cerâmicos.

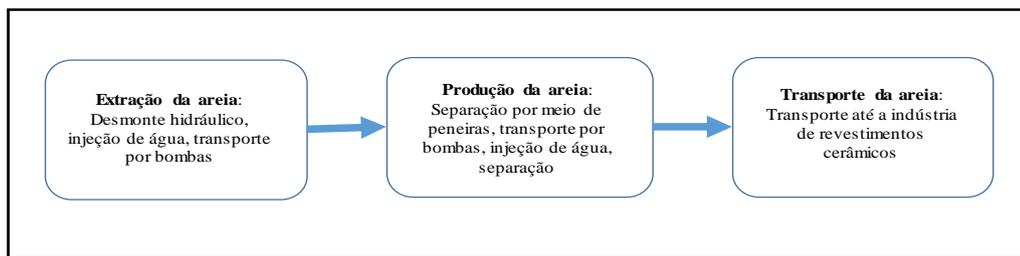


Figura 2 – Limites do sistema produção da areia

Fonte: Adaptado de Souza (2012).

A Figura 3 mostra os limites do processo produtivo do clínquer desde a extração das matérias-primas até a produção do clínquer.

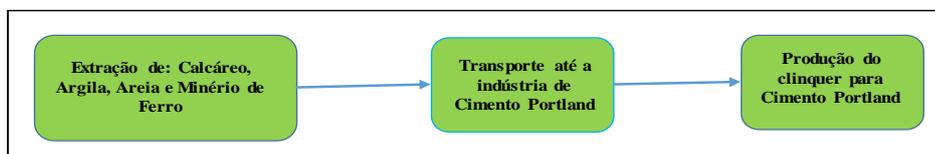


Figura 3 – Limites do sistema de produção do clínquer

Fonte: Adaptado de Souza (2012).

A unidade funcional utilizada neste estudo foi para as cinzas pesadas “1.000 kg de cinzas pesadas geradas”, para a areia destinada a indústria de revestimentos cerâmicos, “1.000 kg de areia produzida” e para o clínquer destinado a produção de cimento Portland “1.000 kg de clínquer produzido”.

O cálculo do inventário foi baseado em dados primários coletados diretamente na Tractebel e os dados secundários foram coletados da literatura e na base de dados *Ecoinvent* do *software* SimaPro 8.0. A avaliação usou o *software* SimaPro e o método ReCiPe *endpoint* H. Foi escolhido o método ReCiPe porque além da coerência entre a caracterização no *midpoint* e a caracterização do *midpoint* até o *endpoint* apontada por Hauschild et al. (2013), foram utilizados nesta pesquisa, valores numéricos europeus sendo que esse método é normalizado para a Europa e também por constar da base de dados do *software* SimaPro. O método ReCiPe, segundo Goedkoop et al. (2008) pode avaliar os impactos sobre três perspectivas diferentes: Individualista (I) de curto prazo, Hierárquico (H), modelo de consenso, e Igualitário (E), visão de longo prazo. Nesta avaliação foi escolhida a perspectiva Hierárquico (H) pois segundo os proponentes do método é o modelo de consenso entre os pesquisadores do método.

4 RESULTADOS

Neste item são apresentados os inventários da produção das cinzas pesadas, produção de cinzas para uso na indústria de revestimentos, produção de cinzas para uso na indústria de cimentos Portland, da produção da areia e da produção de clínquer para a indústria de cimento Portland.

4.1 Inventários dos processos produtivos

A Tabela1 apresenta o inventário das cinzas pesadas provenientes da combustão do carvão mineral. O inventário das cinzas dispostas nas lagoas correspondem as colunas (1) e (2). O inventário das cinzas para o uso na indústria de revestimentos cerâmicos são as colunas (1), (2), (3) e (4). O inventário das cinzas para uso na indústria de cimento Portland são as colunas (1), (2), (3) e (5).

Tabela 1 – Ciclo de vida das cinzas pesadas (por 1.000 kg de cinzas pesadas)

Inventário comum para os dois usos das cinzas				Uso cerâmica (4)	Uso cimento (5)	
Aspectos ambientais	Unidade	Valores				
		Extração do carvão (1)	Geração das cinzas (2)	Retirada cinzas da lagoa e secagem (3)	Transporte p/ ind. cerâmica	Transporte p/ ind. cimento
Entradas						
Carvão ROM	kg	28537				
Carvão Energético (CE)	kg		11940,3			
Água (lagoa)	m ³	6,99				
Água (rio)	m ³		79,1			
Uso do solo	m ²		314.000			
Diesel	kg	1,30	3,38	0,126	0,0825	2,06
Elettricidade	kWh	46,1	156	6,50		
Transporte por trem	tkm		160			
Transporte por caminhão	tkm		40	2,40	4,00	100
Saídas						
Carvão energético	kg	11940,3				
Cinzas pesadas	kg		1000	1000	1000	1000
Emissões para o ar						
CH ₄	kg	2,44	1,25E-32			
CO ₂	kg	2,24	1,69			
CO	kg		0,0100			
SO ₂	kg		23,2			
N ₂ O	kg		1,24E-04			
NO ₂	kg		1,22E-02			
Particulado < 2,5µm	kg		15,4			
Particulado > 10µm	kg		3,83			
Particulado > 2,5µm < 10µm	kg		1,80			
Emissões para a água						
Sólidos totais	kg	18,6				
Sulfatos	kg	9,55				
Alumínio	kg	5,38E-02				
Cobre	kg	3,50E-05				
Ferro	kg	5,43E-03				
Manganês	kg	2,73E-02				
Zinco	kg	9,80E-04				

Fonte: Adaptado de Restrepo (2012).

A Tabela 2 apresenta o inventário do ciclo de vida da areia, adaptado por Castro, Silva, Arduin, Oliveira e Becere (2015) para as condições brasileiras.

Tabela 2 – Ciclo de vida da produção de areia (por 1.000 kg de areia)

Aspectos ambientais	Valor	Unidade
Entradas		
Areia	1000	kg
Diesel	74,1	MJ
Elettricidade	0,130	kWh
Óleo lubrificante	0,0146	kg
Aço para manutenção	0,130	kg
Borracha	2,00E-03	kg
Transporte caminhão, 3.5-20t	3,00E-03	tkm
Transporte caminhão, 20-28t	2,92E-03	tkm
Transporte caminhão 3.5-20t para indústria cerâmica	100	tkm
Diesel (transporte para indústria cerâmica)	2,06	kg
Saídas		
Areia	1000	kg
Resíduos para tratamento		
Borracha	2,00E-03	kg
Óleo lubrificante	0,0146	kg
Aço	0,0130	kg

Fonte: Adaptado de Castro et al. (2015).

A Tabela 3 mostra o inventário da produção de clínquer para uma indústria de cimento. Os dados foram adaptados da base de dados *Ecoinvent* do *software* SimaPro para a matriz brasileira de água (BR) e eletricidade (BR). As demais informações referem-se a dados europeus.

Tabela 3 – Ciclo de vida do clínquer (por 1.000 kg de clínquer)

Aspectos ambientais	Valor	Unid.	Aspectos ambientais	Valor	Unid.
Entradas			Saídas		
Recursos			Produtos		
Água (BR)	1,62	m ³	Clinquer	1000	kg
Materiais/Combustíveis			Emissões para o ar		
Amônia	9,08E-01	kg	Amônia	2,28E-02	kg
Óleo lubrificante	4,71E-02	kg	Antimônio	2,00E-06	kg
Calcário marga	466	kg	Arsênico	1,20E-05	kg
Argila	331	kg	Berílio	3,00E-06	kg
Calcário	841	kg	Cádmio	7,00E-06	kg
Areia	9,26E+00	kg	Dióxido de carbono biogênico	15,1	kg
Cal hidratado	3,92E+00	kg	Dióxido de carbono fóssil	839	kg
Refratário básico	1,90E-01	kg	Monóxido de carbono, fóssil	4,72E-01	kg
Refratário, argila refratária	8,21E-02	kg	Crômio	1,45E-06	kg
Refratário, alto teor de óxido de alumínio	1,37E-01	kg	Cobalto	4,00E-06	kg
Cimento	6,27E-09	p	Cobre	1,40E-05	kg
Diesel utilizado em máquinas internas	1,34E+01	MJ	Dioxina, 2,3,7,8 Tetraclorodibenzo-p-	9,6E-10	kg
Máquinas industriais pesadas	3,76E-02	kg	Calor, perdas	3620	MJ
Eletricidade (BR)	58,0	kWh	Cloreto de hidrogênio	6,31E-03	kg
Carvão mineral	35,4	kg	Chumbo	8,50E-05	kg
Bauxita	1,20E-01	kg	Mercúrio	3,30E-05	kg
Aço cromo 18/8	5,86E-02	kg	Metano, fóssil	8,88E-03	kg
Gás natural, high pressure	6,81	MJ	Níquel	5,00E-06	kg
Óleo combustível pesado	25,5	kg	Óxidos de nitrogênio	1,08	kg
Óleo combustível leve	3,74E-01	kg	NMVOC	5,64E-02	kg
Coque de petróleo	3,91	kg	Particulados < 2.5 um	2,41E-02	kg
Transporte, caminhão 3.5-20t	8,61E-02	tkm	Particulados, > 10 um	5,66E-03	kg
Transporte, caminhão 20-28t	2,68	tkm	Particulados, > 2.5 um e < 10um	7,92E-03	kg
Transporte, caminhão >28t	2,11	tkm	Selênio	2,00E-06	kg
Transporte, Furgão <3.5t	7,09E-02	tkm	Dióxido de enxofre	3,55E-01	kg
Transporte, barçaça	7,22	tkm	Tálio	1,30E-05	kg
Transporte, ferroviário	7,09	tkm	Estanho	9,00E-06	kg
Transporte, ferroviário	17,7	tkm	Vanádio	5,00E-06	kg
Água tratada (consumidor)	340	kg	Zinco	6,00E-05	kg
			Cromo VI	5,5E-07	kg
			Resíduos para tratamento		
			Disposição, resíduo inerte, 5% de água, aterro para material inerte	8,00E-02	kg
			Disposição, resíduo sólido urbano, 22.9% de água, para incineração municipal	4,50E-02	kg

Fonte: Adaptado do SimaPro (2015).

4.2 Impactos ambientais medidos pela pontuação única

A Tabela 4 apresenta os dados de impactos ambientais calculados pelo *software* SimaPro, baseados nos inventários das Tabelas 1, 2 e 3, utilizando o método ReCiPe *endpoint* H pontuação única.

Tabela 4 – Impactos ambientais método ReCiPe *endpoint* H pontuação única

Processo	Pontuação			
	Saúde Humana	Ecossistema	Recursos	Total
Geração de cinzas pela termelétrica	163,6	32,6	0,21	196,4
Geração de cinzas para cerâmica	163,7	32,6	0,21	196,5
Geração de cinzas para cimento	164,9	33,2	0,212	198,3
Produção de clínquer	28,2	16,2	0,084	44,5
Produção de areia	1,6	0,7	0,001	2,3
Total	522	115,3	0,72	638,1

Fonte: Dados da pesquisa.

A Figura 4 mostra de forma gráfica as informações da Tabela 4.

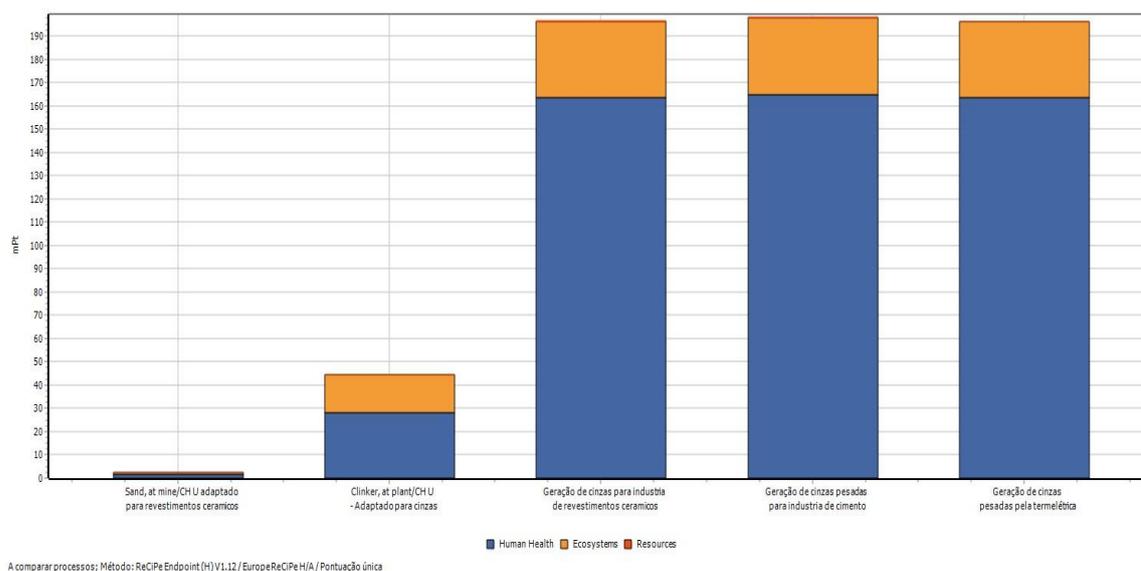


Figura 4 – Comparação entre os processos método ReCiPe *endpoint* H pontuação única

Fonte: Dados da pesquisa.

A categoria Saúde Humana (*Human Health*) é a mais afetada pelos cinco cenários, se somar-se os valores totais de pontos de impacto (198,3 + 196,6 + 196,4 + 44,5 + 2,3) têm-se 638,1 e para a Saúde Humana têm-se 522 o que representa 81,8% da pontuação única total. A categoria Ecossistema (*Ecosystems*) é a segunda, na ordem decrescente com (32,6 + 33,2 + 32,6 + 16,2 + 0,7) 115,3 e representa 18,1% da pontuação única total. A categoria Recursos (*Resources*) representa somente 0,1% dos impactos avaliados.

4.3 Cálculo da ecoeficiência conforme a norma ABNT NBR ISO 14045

O valor do produto adotado foi a geração diária (em toneladas) de cinzas pesadas pela termelétrica, média diária no ano de 2010 de 804,65 toneladas. Foi utilizado o valor referente ao ano de 2010 porque os dados aqui utilizados são referentes à pesquisa de Restrepo (2012, 2015) realizada nesse ano na usina em questão.

O impacto ambiental utilizado na medida de ecoeficiência foi calculado por meio do *software* SimaPro utilizando o método ReCiPe *endpoint* H normalizado conforme apresentado na Tabela 4 anteriormente.

I) Ecoeficiência da termelétrica pela geração das cinzas pesadas:

$$\text{Ecoeficiência da termelétrica na geração das cinzas pesadas} = \frac{804,65}{196,4} = 4,10$$

II) Ecoeficiência da termelétrica na geração das cinzas pesadas para uso na indústria de revestimentos cerâmicos:

$$\text{Ecoeficiência da termelétrica uso das cinzas para revestimentos cerâmicos} = \frac{804,65}{196,5} = 4,09$$

III) Ecoeficiência da termelétrica na geração das cinzas pesadas para uso na indústria de cimentos Portland:

$$\text{Ecoeficiência da termelétrica uso das cinzas na indústria de cimento} = \frac{804,65}{198,3} = 4,06$$

Comparando-se, por intermédio do Fator definido pela norma ABNT NBR ISO 14045 (2014), a ecoeficiência dos dois processos de geração de cinzas para uso na indústria de revestimentos cerâmicos e geração de cinzas para uso na indústria de cimento Portland com a geração das cinzas pela termelétrica que é o produto base deste estudo.

a) Comparação da geração de cinzas pesadas para uso na indústria de revestimentos cerâmicos com a geração de cinzas pela termelétrica:

$$\text{Fator}_1 = \frac{4,09}{4,10} = 0,998$$

Interpretando-se o valor do Fator_1 calculado, o uso das cinzas pesadas não aumentaria a ecoeficiência da termelétrica pois para uso na indústria de revestimentos cerâmicos ainda a ecoeficiência ficaria em 0,998 (99,8%) ou aproximadamente 0,2% inferior em relação a disposição das cinzas nas lagoas.

Avaliando-se que as cinzas pesadas poderiam substituir toda areia na produção de revestimentos cerâmicos e portanto não seriam produzidos os impactos ambientais da produção de areia mencionados na Tabela 4 anteriormente (2,3 pontos). Pode-se retirar, para efeito de cálculo, esse valor dos impactos da geração das cinzas pesadas pela termelétrica, pois, pela metodologia ACV, impactos evitados têm o valor negativo. Refazendo-se os cálculos para este caso da produção de areia avaliado tem-se:

$$\text{Ecoeficiência da termelétrica uso das cinzas para revestimentos cerâmicos} = \frac{804,65}{196,6-2,3} = 4,14$$

$$\text{Fator}_{1a} = \frac{4,14}{4,10} = 1,0097$$

A ecoeficiência de termelétrica passaria de (0,998) 0,2% inferior para (1,0097) 0,97% superior quando comparada com a geração das cinzas e a sua disposição nas lagoas da termelétrica. São valores percentualmente pequenos mas que alteram o valor da ecoeficiência da empresa para um determinado produto visto que, por enquanto, as cinzas são sempre geradas independentemente da avaliação ambiental ou processo de gestão da produção.

b) Comparação da geração de cinzas pesadas para uso na indústria de cimento Portland com a geração de cinzas pela termelétrica:

$$\text{Fator}_2 = \frac{4,06}{4,10} = 0,990$$

Interpretando-se o valor do Fator_2 calculado, o uso das cinzas na substituição do clínquer na indústria de cimento não aumentaria a ecoeficiência da termelétrica pois para o uso na indústria de cimentos a ecoeficiência ficaria em 0,99 ou aproximadamente 1 % inferior em relação a disposição das cinzas nas lagoas.

Para o caso da substituição do clínquer por cinzas pesadas, essa matéria-prima alternativa, cinzas pesadas, não poderá substituir totalmente o uso do clínquer na produção de cimento. A norma ABNT NBR 5736: 1991 limita o uso de material pozolânico na constituição do cimento Portland CP IV em valores entre 15-50% em massa (ABNT, 1991). Por esse motivo não foi possível utilizar o mesmo procedimento do Fator_1 diminuindo o valor total da pontuação referente ao processo produtivo do clínquer.

Supondo-se que uma substituição progressiva do uso do clínquer na produção de cimento Portland pelas cinzas pesadas, conforme os limites estabelecidos pela norma ABNT NBR 5736, tenha como consequência uma redução proporcional no impacto ambiental medido pela pontuação única (Tabela 4), baseado na Equação 1 e Equação 2, calculou-se:

- 1) Valores da redução proporcional do impacto gerado na produção do clínquer (44,5) à porcentagem de redução em massa;
- 2) Redução dos valores (pontuação) dos impactos da geração das cinzas pesadas pela termelétrica para uso na indústria de cimento Portland proporcionais à redução do clínquer;
- 3) Ecoeficiência para cada novo valor de impacto da geração de cinzas do item anterior;
- 4) Fator_{2a} para cada novo valor de ecoeficiência da geração de cinzas;
- 5) Porcentagem equivalentes aos valores do Fator_2 .

A Tabela 5 mostra os valores encontrados, conforme a sequência descrita anteriormente.

Tabela 5 – Substituição parcial do clínquer por cinzas pesadas

Substituição do clínquer (%)	Redução do impacto do clínquer (pontuação)	Novo valor do impacto geração cinzas (pontuação)	Ecoeficiência geração cinzas	Fator _{2a}	Porcentagem
15	6,68	191,62	4,20	1,024	2,4
20	8,90	189,40	4,25	1,037	3,7
25	11,13	187,17	4,30	1,049	4,9
30	13,35	184,95	4,35	1,061	6,1
35	15,58	182,72	4,40	1,073	7,3
40	17,80	180,50	4,46	1,088	8,8
45	20,03	178,27	4,51	1,100	10,0
50	22,25	176,05	4,57	1,115	11,5

Fonte: Elaborada pelos autores.

O que se pode notar na Tabela 5 é que a substituição progressiva do uso do clínquer por cinzas pesadas na produção de cimento Portland melhora a ecoeficiência da termelétrica já à partir de 15% o que poderá significar que valores mesmo considerados pequenos poderão alterar a melhoria de ecoeficiência da termelétrica. Dentro da hipótese adotada a ecoeficiência da termelétrica com o uso das cinzas pesadas na indústria de cimento Portland poderá chegar a ser 11,5% superior em comparação à disposição final das cinzas nas lagoas quando se substitui 50% do clínquer por cinzas pesadas.

Verificando-se os valores comparativos calculados de ecoeficiência da termelétrica nos dois processos, uso na indústria de revestimentos cerâmicos tem a possibilidade de aumentar de 0,998 (ou menos 0,2%) para 1,0097 (ou mais 0,97%) e uso na indústria de cimento Portland com a possibilidade de aumentar de 0,990 (ou menos 1%) para 1,024 a 1,115 (ou mais 2,4% a 11,5%). Em termos ambientais, pode-se inferir que o uso das cinzas pesadas na substituição do clínquer na produção de cimento Portland, é uma opção ambiental mais vantajosa para a termelétrica. Portanto utilizando-se as cinzas pesadas tanto na substituição da areia ou do clínquer poderá melhorar a ecoeficiência das empresas termelétricas.

Além do aumento da ecoeficiência da termelétrica, pelo uso das cinzas pesadas, que é um resíduo inerente ao processo de combustão de carvão, a substituição do clínquer ocasionará diminuição dos impactos ambientais na produção de cimento Portland.

Algumas pesquisas mostraram que a substituição do clínquer por resíduos industriais diminui os impactos ambientais tanto do cimento como do concreto:

a) Gäbel e Tillman (2005) citaram que algumas opções interessantes na produção de cimento é o aumento da utilização de subprodutos industriais e resíduos como aditivos, matérias-primas ou combustível. Um aumento na utilização de subprodutos e resíduos substitui o uso de recursos minerais naturais e reduz o consumo total das matérias-primas. O aumento da utilização desses materiais tem como consequência redução das emissões de CO₂ pelas matérias-primas originais. A redução da emissão de CO₂ é maior quanto maiores quantidades de clínquer for substituído na mistura que compõe o cimento, em comparação com quando se substitui parte do calcário na farinha crua. A redução das emissões de NO_x e SO₂ também acontece, com o aumento do uso de subprodutos e resíduos na mistura de cimento. E, aumentando-se o uso desses materiais na farinha crua também ocasiona redução nas emissões de CO e de compostos orgânicos voláteis (VOC).

b) Chen, Habert, Bouzidi, Jullien e Ventura (2010) afirmaram que, para reduzir o impacto ambiental do cimento e do concreto, as indústrias têm sido estimuladas ao longo dos últimos 10 anos, aumentar a substituição de cimento Portland por materiais alternativos que são principalmente resíduos ou subprodutos industriais. Estudos têm confirmado que o cimento Portland é a principal fonte de CO₂ gerado por misturas de concreto típicas produzidas comercialmente, sendo responsável por 74-81% das emissões de CO₂ de concreto.

5 CONCLUSÕES

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a utilização das cinzas pesadas provenientes da combustão do carvão mineral pelas usinas termelétricas como matéria-prima alternativa na substituição de areia industrial na indústria de revestimentos cerâmicos e também na substituição de clínquer na indústria de cimento Portland.

Foi realizada a avaliação da ecoeficiência dos processos de geração de cinzas de carvão mineral, de produção e extração de areia para uso na indústria de revestimentos cerâmicos e de produção de clínquer para a indústria de cimento.

A avaliação seguiu a norma ABNT NBR ISO 14045 que orienta que os impactos ambientais sejam avaliados com a utilização da ACV, conduzida em conformidade com as normas ABNT NBR ISO 14040 e ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2014).

Dentro deste estudo de valorização de resíduos, foi colocada a seguinte questão de pesquisa: Como medir a ecoeficiência ambiental das empresas, quando valorizam seus resíduos sólidos industriais ao destiná-los como matéria-prima alternativa para outros setores indústrias?

Dentro do limite desta pesquisa, pode-se inferir que a medida de ecoeficiência seja realizada da seguinte forma: avaliação dos impactos ambientais por meio da pesquisa dos aspectos ambientais envolvidos no processo produtivo desde a extração das matérias-primas até a disposição final do(s) resíduo(s) e compará-los com o processo produtivo com a inclusão de o uso desses resíduos em outros processos produtivos. Para essa avaliação utilizar a Avaliação do Ciclo de Vida do resíduo (ou dos resíduos) a ser valorizado. Verificar quais são os impactos ambientais e se há possibilidade minimizá-los ou eliminá-los. Calcular o valor da ecoeficiência do processo.

As principais limitações deste estudo são: por ser um estudo de caso único, não é possível generalizar os resultados; os dados de inventário da produção de areia e também da produção de clínquer para a indústria de cimento Portland foram adaptados de uma base de dados referentes a empresas europeias e que podem não refletir as condições encontradas nas empresas brasileiras; as emissões para o ar, solo e água e as condições de tratamento de resíduos também referem-se a países europeus e podem ter especificidades diferentes das condições brasileiras.

Como sugestões para futuras pesquisas:

- a) Avaliar a ecoeficiência do processo produtivo do uso das cinzas pesadas como matéria-prima alternativa substituindo a areia industrial na produção de revestimentos cerâmicos, incluindo o processo produtivo dos revestimentos cerâmicos e comparar com a ecoeficiência da geração das cinzas pesadas e disposição nas lagoas da termelétrica.
- b) Avaliar a ecoeficiência do processo produtivo do uso das cinzas pesadas como matéria-prima alternativa substituindo o clínquer na produção de cimento Portland, incluindo o processo produtivo do cimento Portland e comparar com a ecoeficiência da geração das cinzas pesadas e disposição nas lagoas da termelétrica.

Referências:

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1991). *NBR 5736: Cimento Portland pozolânico*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009a). *NBR ISO 14040: Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009b). *NBR ISO 14044: Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – requisitos e orientações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR ISO 14045: Gestão ambiental – avaliação da ecoeficiência de sistema de produto – princípios, requisitos e orientações*. Rio de Janeiro.

- Asokan, P., Saxena, M., & Asolekar, S. R. (2005). Coal combustion residues – environmental implications and recycling potentials. *Resources, Conservation and Recycling*, 43(3), 239-262.
- Babbitt, C. W., & Lindner, A. S. (2005). A life cycle inventory of coal used for electricity production in Florida. *Journal of Cleaner Production*, 13(9), 903-912.
- Barbieri, J. C. (2007). *Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos*. São Paulo: Saraiva.
- Bautista-Lazo, S., & Short, T. (2013). Introducing the all seeing eye of business: a model for understanding the nature, impact and potential uses of waste. *Journal of Cleaner Production*, 40, 141-150.
- Blengini, G. A. (2008). Using LCA to evaluate impacts and resources conservation potential of composting: a case study of the Asti District in Italy. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(12), 1373–1381.
- Bréchet, T., & Li, S. (2013). The many traps of green technology promotion. *Environmental Economics and Policy Studies*, 15(1), 73-91.
- Campos, L. F. A., Menezes, R. R., Lisboa, D., Santana, L. N. L., Neves, G. A., & Ferreira, H. C. (2007). Planejamento experimental no estudo da maximização do teor de resíduos em blocos e revestimentos cerâmicos. *Cerâmica*, 53(328), 373-380.
- Carvalho, A., & Barbieri, J. C. (2010). Sustentabilidade e gestão da cadeia de suprimento: conceitos e exemplos. In A. Vilela & J. Demajorovic (Orgs). *Modelos e ferramentas de gestão ambiental – desafios e perspectivas para as organizações*. São Paulo: Senac.
- Castro, A. L., Silva, F. B., Arduin, R. H., Oliveira, L. A., & Becere, O. H. (2015). Análise da viabilidade técnica da adaptação de dos internacionais de inventário de ciclo de vida para o contexto brasileiro: um estudo de caso do concreto para paredes moldadas no local. *Anais do Congresso Brasileiro do Concreto*. Bonito, MS, 57.
- Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y., Jullien, A., & Ventura, A. (2010). LCA allocation procedure used as an initiative method for waste recycling: an application to mineral additions in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1231-1240.
- Chertow, M. R. (2000). Industrial symbiosis: literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and Environment*, 25, 313-337.
- Chowdhury, R., Apul, D., & Fry, T. (2010). A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(4), 250-255.
- Demajorovic, J. (2010). Ecoeficiência em serviços: diminuindo impactos e aprimorando benefícios ambientais. In A. Vilela & J. Demajorovic (Orgs). *Modelos e ferramentas de gestão ambiental – desafios e perspectivas para as organizações*. São Paulo: Senac.
- Di Bella, G., Di Trapani, D., Mannina, G., & Viviani, G. (2012). Modeling of perched leachate zone formation in municipal solid waste landfills. *Waste Management*, 32(3), 456-462.
- Ekvall, T., Assefa, G., Björklund, A., Eriksson, O., & Finnveden, G. (2007). What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management. *Waste Management*, 27(8), 989–996.
- Fungaro, D. A., & Izidoro, J. C. (2006). Remediação de drenagem ácida de mina usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas leves de carvão. *Revista Química Nova*, 29(4), 735-740.
- Gäbel, K., & Tillman, A. M. (2005). Simulating operational alternatives for future cement production. *Journal of Cleaner Production*, 13(13-14), 1246-1257.
- Giannetti, B. F., & Almeida, C. M. V. B. (2006). *Ecologia Industrial: conceitos, ferramentas e aplicações*. São Paulo: Edgard Blucher.

- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & Zelm, R. van. (2008). *ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*. Recuperado em 20 maio, 2015, de <http://www.pre-sustainability.com/recipe>.
- Hauschild, M. S., Goedkoop, M., Guinée, J., Hijungs, R., Huijbregts, M., Joliet, O., Margni, M., Schryver, A. D., Humbert, S., Laurent, A., Sala, S., & Pant, R. (2013). Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(3), 683-697.
- Hodge, M., Ochsendorf, J., & Fernández, J. (2010). Quantifying potential profit from material recycling: a case study in brick manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 18(12), 1190-1199.
- International Standard – ISO 14045. (2012). Environmental management – Eco-efficiency assessment of product systems – Principles, requirements and guidelines. Geneva: Switzerland.
- Jelinski, L. W., Graedel, T. E., Laudise, R. A., McCall, D. W., & Patel, C. K. N. (1992). Industrial ecology: concepts and approaches. *Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America*, 89(3), 793-797.
- Kniess, C. T. (2005). *Desenvolvimento e caracterização de materiais cerâmicos com adição de cinzas pesadas de carvão mineral*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- Kniess, C. T., Prates, P. B., Martins, G., Riella, H. G., Bernardini, A., & Bys, M. (2011). Obtenção e caracterização de produtos cerâmicos com a adição de cinzas pesadas de carvão mineral provenientes de usinas termelétricas. *Anais do Congresso Brasileiro de Cerâmica*, Porto de Galinhas, PE, 55.
- Knight, P., & Jenkins, J. O. (2009). Adopting and applying eco-design techniques: a practitioner's perspective. *Journal of Cleaner Production*, 17(5), 549-558.
- Laner, D., Crest, M., Scharff, H., Morris, J. W. F., & Barlaz, M. A. (2012). A review of approaches for the long-term management of municipal solid waste landfills. *Waste Management*, 32(3), 498-512.
- Liang, S., & Zhang, T. (2012). Comparing urban solid waste recycling from the viewpoint of urban metabolism based on physical input–output model: a case of Suzhou in China. *Waste Management*, 32(1), 220-225.
- Manzini, E., & Vezzoli, C. (2008). *O desenvolvimento de produtos sustentáveis*. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- Masi, S., Caniani, D., Griego, E., Lioi, D. S., & Mancini, I. M. (2014). Assessment of the possible reuse of MSW coming from landfill mining of old open dumpsites. *Waste Management*, 34(3), 702-710.
- Menéndez, E., Álvaro, A. M., Argiz, C., Parra, J. L., & Moragues, A. (2013). Characterization of bottom ashes from coal pulverized Power plants to determine their potential use feasibility. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 52(6), 296-304.
- Merrild, H., Larsen, A. W., & Christensen, T. H. (2012). Assessing recycling versus incineration of key materials in municipal waste: the importance of efficient energy recovery and transport distances. *Waste Management*, 32(5), 1009-1018.
- Oss, H. G., van, & Padovani, A. C. (2003). Cement manufacture and the environment – part II: environmental challenges and opportunities. *Journal of Industrial Ecology*, 7(1), 93-126.
- Ramadoss, P., & Sundararajan, T. (2014). Utilization of lignite-based bottom ash as partial replacement of fine aggregate in masonry mortar. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(2), 737-745.

- Restrepo, A. H. V. (2012). *Metodologia de análise e avaliação exergoambiental de plantas termoelétricas operadas em combustão combinada carvão-biomassa*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- Restrepo, A. H. V., Bazzo, E., & Miyake, R. (2015). A life cycle assessment of the Brazilian coal used for electric power generation. *Journal of Cleaner Production*, 92, 179-186.
- SimaPro Database*. (2015). Pré Consultants, Amersfoort, Netherlands.
- Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. (2015). *Processo de produção*. Recuperado em 11 maio, 2015, de <http://www.snic.org.br/processo.asp>.
- Souza, M. P. R. (2012). *Avaliações das emissões de CO₂ antrópico associadas ao processo de produção do concreto, durante a construção de um edifício comercial, na Região Metropolitana de São Paulo*. Dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, SP.
- Srivastava, S. K. (2007). Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews*, 9(1), 53-80.
- Teixeira, C. E. (2001). *Évolution biochimique des résidus de désencrage dans un contexte de valorisation comme barrière de recouvrement*. Tese de doutorado, Université de Sherbrooke, Québec, Canadá.
- Tonini, D., & Astrup, T. (2012). Life-cycle assessment of a waste refinery process for enzymatic treatment of municipal solid waste, *Waste Management*, 32(1), 165-176.
- Yin, R. K. (2010). *Estudo de caso: planejamento e métodos*. Porto Alegre: Bookman.
- Zanchet, A., Dal'Acqua, N., Weber, T., Crespo, J. S., Brandalise, R. N., & Nunes, R. C. R. (2007). Propriedades reométricas e mecânicas e morfologia de compósitos desenvolvidos com resíduos elastoméricos vulcanizados. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 17(1), 23-27.
- Zhang, B., Bi, J., Fan, Z., Yuan, Z., & Ge, J. (2008). Eco-efficiency analysis of industrial system in China: a data envelopment analysis approach. *Ecological Economics*, 68(1-2), 306-316.