

## DESEMPENHO AMBIENTAL DE CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND COM SUBSTITUIÇÃO POR CINZA VOLANTE

*Magali Rejane Rigon\*, Elenize Ferreira Maciel, Iara Janaína Fernandes, Carlos Eduardo Braun, Maurício Mancio*

\* Universidade do Vale do Rio do Sinos (UNISINOS) – [magali@rigonengenharia.com.br](mailto:magali@rigonengenharia.com.br)

### SÚMULA

O concreto é um dos materiais de construção mais importantes da atualidade, sendo produzidas mais de 25 bilhões de toneladas por ano. A utilização de cinza volante (CV), um subproduto gerado a partir da queima de carvão mineral para geração de energia, surge como uma alternativa para minimização dos impactos gerados pela produção e consumo do cimento Portland. Nesse contexto, este trabalho tem por objetivo realizar um estudo sobre o desempenho ambiental obtido por concretos com diferentes teores de substituição de cimento por CV, a partir da ferramenta de Análise do Ciclo de Vida. Os estudos de ACV foram realizados com auxílio do software BEES 4.0. Através da comparação, pode-se constatar que a utilização da CV em substituição de parte do cimento Portland traz diversos benefícios ambientais, sendo que quanto maiores os teores de substituição, melhor o desempenho ambiental obtido.

**Palavras-chave:** Análise de Ciclo de Vida (ACV), Cinza Volante, desempenho ambiental, software BEES 4.0.

## ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF PORTLAND CEMENT CONCRETE WITH REPLACEMENT BY FLY ASH

### ABSTRACT

Concrete is one of the most important materials nowadays, and there is more than 25 billion tons being produced per year. The utilization of fly ash (FA), a by-product obtained from the mineral coal burning for energy generation, appears as an alternative to the minimization of the impacts generated during the Portland cement production process and consumption. In this context, the aim of this article is to study the concrete environmental performance obtained from different substitution quantities of Portland cement for fly ashes, from the Life Cycle Analyses (LCA) tool. The LCA studies were carried out with the software BEES 4.0 aid. From the concretes comparison it was possible to realize that the partial substitution of Portland cement provides several ecological benefits, since higher substitution quantities lead to better environment performance results.

**Keywords:** Life Cycle Analyses (LCA), fly ash, environment performance, software BEES 4.0.

### 1. INTRODUÇÃO

Com o objetivo de buscar alternativas para minimizar o consumo de matérias-primas e energia, estudos voltados para questões ambientais são cada vez mais requisitados. Muitas pesquisas, tanto de âmbito científico como tecnológico, têm sido realizadas para encontrar formas que possibilitem o retorno de resíduos para o seu ciclo produtivo e para reduzir o impacto ambiental negativo gerado pelas indústrias, como a disposição final destes resíduos em aterros, utilização de recursos não renováveis e consumo energético (CALHEIRO, 2011).

O concreto é um dos materiais de construção mais importantes da atualidade, sendo produzidas mais de 25 bilhões de toneladas deste material por ano (WBCSD, 2009), sendo que em 2012



foram utilizadas aproximadamente 3,7 bilhões de toneladas de cimento Portland em construções no mundo (U.S, 2013). Entretanto, além das grandes quantidades de recursos naturais e da alta demanda energética necessária para produzi-lo, é lançada aproximadamente uma tonelada de dióxido de carbono para cada tonelada de cimento produzida, fazendo com que o concreto seja responsável por uma importante parcela do impacto gerado ao meio ambiente (MEYER, 2009).

Nesse contexto, uma das maneiras de minimizar os impactos para a produção do concreto está na redução do consumo de cimento Portland (CP), que pode ser alcançada por meio da reposição da maior quantidade de cimento por materiais suplementares, como é o caso de subprodutos de processos industriais, resíduos da agricultura e materiais reciclados (MEYER, 2009). Essa necessidade tem encorajado pesquisadores na área da tecnologia de concretos e argamassas a investigar e analisar as propriedades desses subprodutos, quando utilizados como substitutos aos materiais constituintes na sua produção.

Um subproduto normalmente utilizado para produção de cimento Portland é a cinza volante, resíduo gerado a partir da queima de carvão mineral em termoelétricas para a produção de energia elétrica e/ou vapor. A combustão do carvão pulverizado é realizada em altas temperaturas, entre 1200°C e 1600°C, em ambiente gasoso oxidante, sendo o tempo de permanência das partículas em chama oxidante em média de 2 segundos, dessa forma ocorrendo a fusão total ou parcial da matéria mineral. Este processo gera a cinza pesada e a cinza volante (SILVA et al., 1999).

A cinza volante (CV) possui textura fina e é arrastada pelos gases de combustão durante a queima, ficando retida em precipitadores eletrostáticos com rendimento entre 95 e 99%. As cinzas de carvão são compostas basicamente por silício e alumínio, contendo baixos teores em Fe e menores quantidades de Mg, Ca, Ti, P, S, Na e K. O silício e o alumínio são oriundos dos argilominerais (caulinita, montmorilonita e illita), dos óxidos (quartzo) e dos silicatos (cloritas). O Fe é derivado principalmente dos sulfatos como pirita, sendo o Ca e Mg oriundos dos seus correspondentes carbonatos e sulfatos (SILVA et al., 1999).

Para um embasamento científico sob esta perspectiva, é necessário o uso de técnicas que auxiliem na mensuração dos reais impactos associados à utilização deste subproduto. Uma dessas técnicas é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A ACV é uma entre as várias técnicas de gestão ambiental. Normatizada pela ISO 14.040 (ABNT, 2009), sua metodologia de aplicação compreende quatro fases principais: definição do objetivo; definição do escopo; análise de inventário e avaliação de impacto.

Essa ferramenta traz como foco os aspectos ambientais e os impactos potenciais de um produto ao longo do seu ciclo de vida, desde a aquisição da matéria-prima, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final. A partir desta perspectiva, pode fornecer subsídios ao nível de informação na tomada de decisões, na identificação de oportunidades para melhorar o desempenho ambiental dos produtos em vários pontos de seu ciclo de vida, na seleção de indicadores de desempenho ambiental pertinentes e no marketing das instituições (ABNT, 2009).

Bento e Rossignolo (2013) propuseram a aplicação da metodologia da ACV como ferramenta de análise de desempenho ambiental no processo decisório do dimensionamento de estruturas de concreto armado. Estruturas com resistências de 25MPa, 30MPa e 35 MPa foram avaliadas. Os autores verificaram que para todas as categorias de impacto avaliadas, a estrutura com fck (resistência característica à compressão de concreto) de 35MPa foi a menos impactante ao meio ambiente, exercendo a mesma função, seguida pelas estruturas com fck de 30 MPa e 25MPa.

Carvalho (2002) utilizou a ferramenta de ACV para avaliar o efeito da reciclagem da escória de alto forno e da cinza volante nos cimentos Portland, com o objetivo de avaliar os benefícios ambientais da reciclagem. O autor constatou que o processo de fabricação do cimento, especialmente durante a operação de clinquerização, é o responsável pela maior parcela das emissões totais de CO<sub>2</sub> pela indústria da construção civil e que os impactos ambientais poderiam

ser minimizados com a utilização de traços de concreto que utilizem menos cimento, assim como a substituição parcial do clínquer, presente nos cimentos, por coprodutos.

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo foi avaliar e comparar o desempenho ambiental de concretos feitos com 100% de cimento Portland e com substituição de 15 e 20% de cimento em massa por cinza volante através da ferramenta de análise do ciclo de vida.

## 3. MÉTODOS

Foi utilizado o software BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability) para realização das análises de impacto ambiental para os três tipos de concretos estudados. Os dados de produção dos concretos foram obtidos através da base de dados de ACV da Associação de Cimento Portland (Portland Cement Association) (BEES, [nd]).

O objetivo da ACV do software BEES é gerar resultados de desempenho ambiental para as alternativas de produtos da construção civil disponíveis nos Estados Unidos, permitindo a obtenção de escores e a determinação de materiais ambientalmente preferíveis no mercado. Tendo em vista que o foco deste trabalho foi centrado nas questões relacionadas ao desempenho ambiental dos concretos analisados, foi definido um peso relativo de 100% para o desempenho ambiental e de 0% para o desempenho econômico.

O escopo deste trabalho enfoca no processo de obtenção e processamento das matérias-primas, no processo de fabricação do concreto, além das etapas de uso e disposição final dos resíduos. Vários dos estágios de processos estão combinados para simplificar a análise dos elementos do inventário.

A análise de inventário implica na quantificação dos fluxos para o sistema de um produto. Os fluxos de inventário incluem entradas de água, energia e matérias-primas, assim como as descargas para o ar, solo e água. O diagrama de fluxos para o processo de obtenção dos concretos, com indicação dos principais elementos no processo de produção e dos limites do sistema, está apresentado na Figura 1.

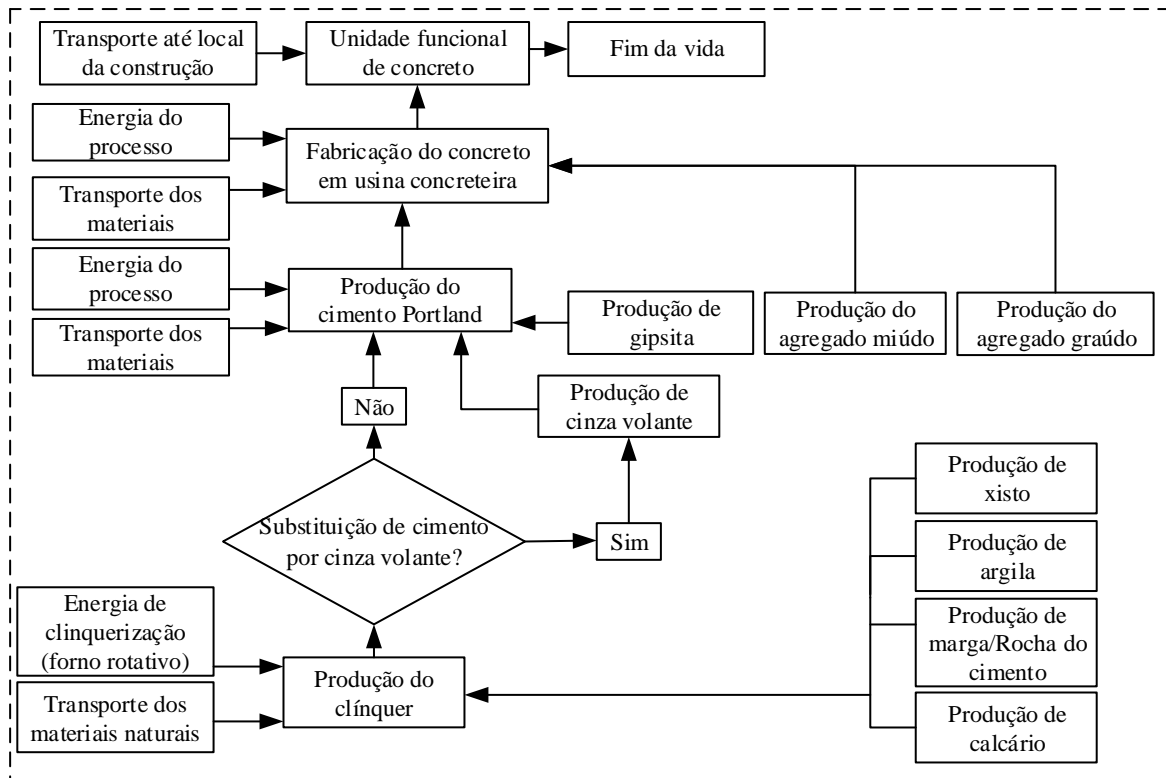


Figura 1: Limites do sistema de produção do concreto produzido com e sem substituição do cimento (fonte: adaptado do software BEES).

A unidade funcional utilizada pelo sistema, já que os produtos modelados a partir de concreto são mensurados em volume, foi de 0,76 m<sup>3</sup>, o equivalente a 1 jarda cúbica. Os concretos utilizados apresentam a mesma resistência de 34 MPa, o equivalente a 5.000 lb/plg<sup>2</sup> (BEES, [nd]). Os materiais utilizados para fabricação dos concretos foram cimento Portland, agregado miúdo (areia ou finos de rocha triturada), agregado graúdo (cascalho ou rocha triturada) e água, além de CV em substituição ao cimento. Os teores de substituição ao cimento analisados foram de 15 e 20%, em massa. A Tabela 1 apresenta os traços de concreto analisados.

Tabela 1: Traços considerados para confecção dos concretos

| Material        | Quantidade em kg/m <sup>3</sup> |                     |                     |
|-----------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|
|                 | 100% cimento Portland (CP)      | 15% de substituição | 20% de substituição |
| Cimento         | 335                             | 284,75              | 268                 |
| Cinza Volante   | 0                               | 50,25               | 67                  |
| Agregado Graúdo | 1187                            | 1187                | 1187                |
| Agregado Miúdo  | 712                             | 712                 | 712                 |
| Água            | 141                             | 141                 | 141                 |

Fonte: BEES, [nd].

O software permite a determinação de pesos para os impactos ambientais analisados, de acordo com quatro categorias pré-estabelecidas. Na análise de impacto ambiental geral, foram considerados apenas os impactos relevantes, sendo atribuídos os mesmos pesos para todas as variáveis. Foram considerados os impactos apresentados na Tabela 2, que elucida o método de avaliação de cada um.

Tabela 2: Método de avaliação para as categorias de aspectos e impactos ambientais analisados

| Categoria de aspecto e impacto      | Método de avaliação do software BEES   |
|-------------------------------------|--|
| Energia incorporada                 | A energia incorporada total em MJ por unidade funcional é classificada em energia renovável e não renovável. Sendo a energia derivada de combustíveis fósseis, como o petróleo, gás natural e carvão, classificada como não renovável, enquanto a energia de outras fontes (hidrelétrica, eólica, nuclear, geotérmica, biomassa) é classificada como renovável.            |
| Potencial de aquecimento global     | Potenciais de aquecimento global em gramas de CO <sub>2</sub> por unidade funcional de um produto, que mede a quantidade de dióxido de carbono com o mesmo potencial de aquecimento global ao longo de um período de 100 anos.   |
| Potencial de Acidificação           | Potencial de acidificação no solo e água em gramas de íons de hidrogênio por unidade funcional do produto, representando a quantidade de emissões de íons de hidrogênio com o mesmo efeito potencial acidificante.   |
| Potencia de eutrofização            | Potencial de eutrofização em gramas de N por unidade funcional do produto.   |
| Esgotamento de combustíveis fósseis | Potencial de esgotamento dos combustíveis fósseis em MJ excedentes por unidade funcional do produto, permitindo avaliar os requisitos de excedente de energia a partir do consumo de combustíveis fósseis.   |
| Esgotamento de recursos hídricos    | Aborda apenas o impacto esgotamento dos recursos hídricos (água potável), não o uso da água em atividades como a produção do produto.  |
| Poluição atmosférica                | São necessárias as quantificações de lançamentos ao ar de óxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> ), material particulado (MP) e óxidos de enxofre   |
| Toxicidade ecológica                | Considera mais de 150 substâncias potencialmente tóxicas para o meio ambiente. Entre essas substâncias estão mercúrio (Hg), cádmio (Cd), cromo tri e hexavalente (Cr III e Cr VI), naftaleno (C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> ), berílio (Be), arsênio (As), níquel (Ni), cobre (Cu), vanádio (V), cobalto (Co), selênio (Se), zinco (Zn), chumbo (Pb), entre outros.       |
| Formação de Smog                    | O número de substâncias consideradas, e que podem gerar este impacto é superior a 100. Sendo necessárias as quantificações de furano (C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O), propileno (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> ), formaldeído (CH <sub>2</sub> O), acetaldeído (CH <sub>3</sub> CHO), aldeídos, óxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> ), entre outros. |

Fonte: LIPPIATTI (2007).

A partir dos resultados obtidos para os concretos com substituição de 15 e 20% de cimento em massa por cinza volante, foi calculado o percentual de redução de cada impacto. Após essa etapa, foi elaborada uma equação linear para cada categoria de impacto, mostrando o aumento do percentual de redução com o aumento do teor de substituição, para que fosse possível calcular o percentual de redução para 50% de substituição. Todos os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) encontrados para as retas de ajuste ficaram acima de 0,999. A partir das equações lineares encontradas foram estimados os percentuais de redução para um teor de substituição de 50%, uma vez que os teores de substituição comportados pelo cimento CP-IV (cimento Portland Pozolânico), no Brasil, chegam a 50% (ABNT, 1991).

Não foram alocados os impactos da produção do subproduto cinza volante, visto que este é um resíduo do processo de queima do carvão para geração de energia.

### 3.1 Energia e emissões

Grande parte do concreto fabricado a partir do cimento Portland é produzida em centrais concreteiras, sendo que a energia utilizada neste processo inclui eletricidade e combustíveis, utilizados para aquecimento e equipamentos móveis.

### 3.2 Transporte

As distâncias de transporte para as matérias-primas até a usina concreteira foram arbitradas em 97 km (60 milhas) para o cimento Portland e cinza volante, e em 80 km (50 milhas) para os agregados, sendo utilizado para estes materiais o transporte rodoviário, por caminhões. Para uma pequena parcela dos materiais, arbitrada em 10%, foi considerada uma distância de transporte



maior que 3.219 km (2.000 milhas), sendo considerado, nestes casos, o transporte ferroviário. Estas distâncias são parâmetros fixos na análise do sistema (BEES, [nd]).

O transporte do concreto pronto até o canteiro de obras é modelado como uma variável no sistema BEES, sendo utilizada uma distância de 62 milhas, o equivalente a 100 km. Foi considerado que o transporte seja realizado por caminhões de carga pesada.

### 3.3 Uso

O concreto utilizado no interior das edificações geralmente não necessita de reparos. No caso de peças de concreto externas, a manutenção pode variar de acordo com as condições climáticas e do ambiente de exposição, mas geralmente consiste de pequenos reparos manuais. Foi considerada uma vida útil de 100 anos para o concreto utilizado e não foram consideradas manutenções nos limites do sistema (BEES, [nd]).

### 3.4 Fim da vida

A grande parte do concreto nos EUA é utilizada em zonas urbanas, onde não é possível a sua disposição em aterros. O concreto é reciclado como preenchimento e base para estradas, e o aço utilizado no reforço é reciclado. As formas de madeira compensada são dispostas em aterros ao fim da vida útil (BEES, [nd]).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de ciclo de vida mostra a soma de impactos ambientais relacionados com o sistema produtivo. Dessa forma, demonstra o desempenho ambiental do produto sob determinadas condições de uso (CARVALHO, 2002). A Tabela 3 apresenta todas as categorias de impacto selecionadas, conforme foi apresentado na metodologia, com os valores obtidos para cada concreto estudado.

Tabela 3: Categorias de impacto e resultados obtidos para cada concreto estudado.

| Impacto  | Categoria   | Concreto 100% CP | Concreto 15% CV | Concreto 20% CV |
|--|---|------------------|-----------------|-----------------|
| Energia Inc.<br>(MJ/un.)                       | Matéria-prima energética                                | 39               | 39              | 39              |
|  | Energia de combustível                                  | 170              | 162             | 159             |
|  | Soma  | 209              | 201             | 198             |
| Aquecimento Global<br>(g CO <sub>2</sub> /un.) | CO <sub>2</sub> , biomassa                              | 811              | 811             | 811             |
|  | CO <sub>2</sub> , fóssil                                | 17.267           | 15.767          | 15.267          |
|  | CH <sub>4</sub>   | 411              | 381             | 372             |
|  | N <sub>2</sub> O  | 84               | 84              | 84              |
|  | Soma  | 18.573           | 17.044          | 16.534          |
| Acidificação<br>(mg H <sup>+</sup> /un.)       | NH <sub>3</sub>   | 6,41             | 5,66            | 5,40            |
|  | HCl   | 60,36            | 54,55           | 52,77           |
|  | HF  | 3,97             | 3,61            | 3,48            |
|  | H <sub>2</sub> S  | 8,00             | 8,00            | 8,00            |
|  | NO <sub>x</sub> e NO <sub>2</sub>                       | 2372,71          | 2208,54         | 2152,49         |
|  | SO <sub>x</sub> e SO <sub>2</sub>                       | 2397,04          | 2209,12         | 2143,09         |
|  | Soma  | 4848,50          | 4489,48         | 4365,23         |
| Eutrofização<br>(g N/un.)                      | NH <sub>3</sub>   | 0,01             | 0,01            | 0,01            |
|  | NO <sub>x</sub> como NO <sub>2</sub>                    | 2,62             | 2,44            | 2,38            |
|  | N <sub>2</sub> O  | 0,03             | 0,03            | 0,03            |
|  | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NH <sub>3</sub> , como N | 0,30             | 0,29            | 0,29            |
|  | DBO   | 0,23             | 0,23            | 0,23            |
|  | DQO   | 0,07             | 0,07            | 0,07            |
|  | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                            | 0,01             | 0,01            | 0,01            |
|  | N (indefinido)  | 0,45             | 0,45            | 0,45            |



| Impacto                               | Categoria  | Concreto 100% CP | Concreto 15% CV | Concreto 20% CV |
|---------------------------------------|--|------------------|-----------------|-----------------|
|                                       | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 0,85             | 0,85            | 0,85            |
|                                       | Soma   | 4,57             | 4,38            | 4,31            |
|                                       |  |                  |                 |                 |
| Esg. Comb. Fósseis (MJ/un.)           | Carvão   | 0,69             | 0,64            | 0,62            |
|                                       | Gás Natural  | 3,98             | 3,85            | 3,80            |
|                                       | Petróleo   | 7,33             | 7,09            | 7,03            |
|                                       | Soma   | 12,00            | 11,57           | 11,45           |
|                                       |  |                  |                 |                 |
| Esg. Rec. Híd. (L/un.)                | Água Utilizada   | 28,9             | 27,7            | 27,3            |
|                                       | Soma   | 28,9             | 27,7            | 27,3            |
| Poluição Atmosférica (MicroDALYs/un.) | NOx como NO <sub>2</sub>                                       | 0,1              | 0,1             | 0,1             |
|                                       | Partículas (PM 10)   | 0,1              | 0,1             | 0,1             |
|                                       | Partículas (PM 10)   | 3,4              | 3,2             | 3,1             |
|                                       | SOx como SO <sub>2</sub>                                       | 0,7              | 0,6             | 0,6             |
|                                       | Soma   | 4,3              | 4,0             | 4,0             |
| Toxicidade ecológica (g 2,4D/un.)     | Dioxinas   | 3,6              | 3,1             | 2,9             |
|                                       | Hg   | 130,6            | 120,0           | 116,3           |
|                                       | NOx como NO <sub>2</sub>                                       | 1,2              | 1,1             | 1,1             |
|                                       | Zn   | 2,0              | 2,0             | 2,0             |
|                                       | Ag <sup>+</sup>  | 3,5              | 3,3             | 3,3             |
|                                       | Outros   | 2,4              | 2,3             | 2,3             |
|                                       | Soma   | 143,3            | 131,8           | 127,8           |
| Formação de Smog (g NOx/un.)          | Monóxido de carbono  | 0,9              | 0,9             | 0,9             |
|                                       | Hidrocarbonetos (exceto CH <sub>4</sub> )                      | 2,2              | 2,1             | 2,1             |
|                                       | Hidrocarbonetos  | 2,0              | 1,9             | 1,9             |
|                                       | NOx como NO <sub>2</sub>                                       | 73,5             | 68,4            | 66,7            |
|                                       | Partículas   | 3,4              | 3,2             | 3,1             |
|                                       | Outros   | 0,5              | 0,5             | 0,5             |
|                                       | Soma   | 82,4             | 76,9            | 75,1            |

Fonte: Elaborado pelos autores, 2014.

Através da análise da Tabela 3 pode-se comprovar que, para todas as categorias de impacto analisadas neste trabalho, os maiores valores foram obtidos para o Concreto 100% CP, seguido do Concreto 15% CV e Concreto 20% CV, respectivamente.

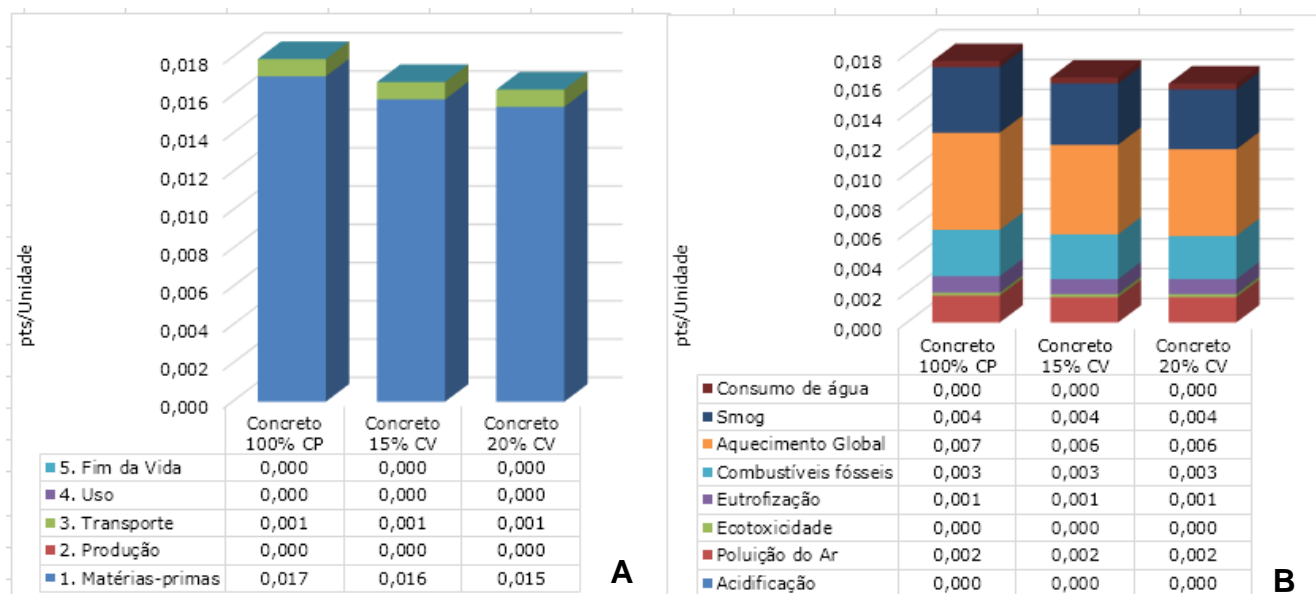


Figura 2: Desempenho ambiental de concretos sem e com CV em pts/unidade – (A) etapa do ACV – (B) fluxos ambientais (fonte: Elaborado pelos autores, 2014).

A Figura 2A mostra que, para todos os concretos analisados, o estágio de ciclo de vida que causa maior impacto é na fase denominada aquisição de matéria-prima, que envolve a produção de cimento, material utilizado que causa o maior impacto ao meio ambiente (OLIVEIRA, 2007). Conforme a Figura 2B, o impacto ambiental mais representativo no desempenho ambiental dos concretos é o impacto do aquecimento global, representado, de acordo com o BEES 4.0, ao lançamento, para a atmosfera, de gases que contribuem para o efeito estufa.

A Tabela 4 apresenta um balanço geral com classificação comparativa dos concretos com diferentes substituições de cinza volante e as categorias de impacto e etapas da ACV. Verifica-se que a amostra com concreto 100% CP atingiu o pior desempenho ambiental, enquanto a amostra com concreto 20% CV obteve o melhor desempenho. Nota-se, claramente, que a adição de resíduos foi determinante nos resultados. Quanto maior a quantidade de resíduos adicionada ao cimento, melhor é o desempenho ambiental da amostra. Em concordância com o desempenho ambiental observado neste estudo, Carvalho (2002) verificou a redução dos impactos ambientais pela utilização de cimentos com diferentes teores de cinza volante e escória de alto forno, diminuindo a utilização do clínquer, em comparação ao cimento sem adição de resíduos.

Tabela 4: Balanço geral das categorias de impacto.

| Categoria                           |                 | Concreto -100% CP | Concreto -15% CV | Concreto -20% CV |
|-------------------------------------|-----------------|-------------------|------------------|------------------|
| Energia incorporada                 | Etapa ACV       | Maior             | Médio            | Menor            |
|                                     | Fluxo ambiental | Maior             | Médio            | Menor            |
| Potencial de aquecimento global     | Etapa ACV       | Maior             | Médio            | Menor            |
|                                     | Fluxo ambiental | Maior             | Médio            | Menor            |
| Potencial de acidificação           | Etapa ACV       | Maior             | Médio            | Menor            |
|                                     | Fluxo ambiental | Maior             | Médio            | Menor            |
| Potencial de eutrofização           | Etapa ACV       | Maior             | Médio            | Menor            |
|                                     | Fluxo ambiental | Maior             | Médio            | Menor            |
| Esgotamento de combustíveis fósseis | Etapa ACV       | Maior             | Médio            | Menor            |
|                                     | Fluxo ambiental | Maior             | Médio            | Menor            |
| Esgotamento de recursos hídricos    | Etapa ACV       | Maior             | Médio            | Menor            |
|                                     | Fluxo ambiental | Maior             | Médio            | Menor            |
| Poluição atmosférica                | Etapa ACV       | Maior             | Médio            | Menor            |
|                                     | Fluxo ambiental | Maior             | Médio            | Menor            |
| Toxicidade ecológica                | Etapa ACV       | Maior             | Médio            | Menor            |
|                                     | Fluxo ambiental | Maior             | Médio            | Menor            |
| Formação de smog                    | Etapa ACV       | Maior             | Médio            | Menor            |
|                                     | Fluxo ambiental | Maior             | Médio            | Menor            |
| Desempenho ambiental                | Etapa ACV       | Maior             | Médio            | Menor            |
|                                     | Fluxo ambiental | Maior             | Médio            | Médio            |

Fonte: Elaborado pelos autores, 2014.

A Tabela 5 apresenta o percentual de redução dos concretos com substituição de cimento Portland por CV para todas as categorias de impacto analisadas. Também pode ser observado nesta Tabela uma estimativa de redução dos impactos quando feita a substituição de cimento Portland por 50% de CV. Estes valores foram calculados através da equação da reta de ajuste



obtida para os teores analisados, conforme descrito na metodologia. É relevante a análise deste percentual uma vez que o cimento CP-IV, muito utilizado no Brasil, principalmente no Rio Grande do Sul, comporta teores de substituição com até 50%. Fica evidente que entre as categorias de impactos analisadas, o potencial de aquecimento global e toxicidade ecológica se destacam entre a redução de impactos quando estimados a substituição de 50%, podendo chegar a valores próximos 30% de redução.

Tabela 5: Percentual de redução dos concretos com CV.

| Categoria de Aspecto e Impacto                     | REDUÇÃO (%)                       |                      |                      |                                     |
|--|-----------------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------|
|  | Concreto -100% CP<br>- Referência | Concreto -<br>15% CV | Concreto -<br>20% CV | Cálculo teórico<br>Concreto -50% CV |
| Energia incorporada                                | 0,00                              | 3,87                 | 5,31                 | 13,17                               |
| Potencial de aquecimento global                    | 0,00                              | 8,24                 | 10,98                | 27,45                               |
| Potencial de acidificação                          | 0,00                              | 7,40                 | 9,97                 | 24,85                               |
| Potencial de eutrofização                          | 0,00                              | 4,26                 | 5,69                 | 14,22                               |
| Esgotamento de combustíveis fósseis                | 0,00                              | 3,58                 | 4,63                 | 11,68                               |
| Esgotamento de recursos hídricos (consumo de água) | 0,00                              | 4,15                 | 5,54                 | 13,84                               |
| Poluição atmosférica                               | 0,00                              | 5,43                 | 7,32                 | 18,24                               |
| Toxicidade ecológica                               | 0,00                              | 8,07                 | 10,84                | 27,04                               |
| Formação de smog                                   | 0,00                              | 6,65                 | 8,92                 | 22,26                               |

Fonte: Elaborado pelos autores, 2014.

O software BEES 4.0 comprova a eficácia de classificação comparativa dos concretos com diferentes substituições de CV em relação às categorias de impacto. No entanto, deve-se ter cautela na utilização dos dados com número absolutos, devendo ser usados preferencialmente de forma comparativa, pois o software utiliza um banco de dados com informações de produtos fabricados e utilizados em um país com características diferentes do Brasil.

## 5. CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados pode-se concluir que a utilização de cinza volante para fabricação de cimento Portland traz vantagens não só pela utilização de um resíduo, mas também pela redução do impacto ambiental negativo associado à produção de cimento Portland.

Com isso, a substituição de cimento Portland por CV contribui decisivamente para redução do impacto ambiental causado pela produção de concreto sem adição de resíduos. O concreto 100% CP atingiu o pior desempenho ambiental e a amostra com 20% CV foi a que obteve o melhor desempenho.

Entre os resultados observados destaca-se que para todas as categorias de impacto, o concreto com 20% de CV é o que ambientalmente menos impacta de forma negativa. O impacto ambiental mais representativo no desempenho ambiental dos concretos é o aquecimento global e para todos os concretos analisados o estágio de ciclo de vida que causa maior impacto é a fase denominada aquisição de matéria-prima.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 14040** – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_ **NBR 5736** – Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.

- BUILDING FOR ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC SUSTAINABILITY – BEES. Generic Concrete Products with Portland Cement. Disponível em: <[http://ws680.nist.gov/Bees/\(A\(AS9hLP8izwEkAAAAMDczM2M4NTktNjc3Ni00MWU2LWE0ZDgtZGFmNDY1NThjZTQ1o0bX550Zxn9h3\\_c9XGcc7IDkyT81\)\)/ProductListFiles/Generic%20Concrete%20Products%20with%20Portland%20Cement.pdf](http://ws680.nist.gov/Bees/(A(AS9hLP8izwEkAAAAMDczM2M4NTktNjc3Ni00MWU2LWE0ZDgtZGFmNDY1NThjZTQ1o0bX550Zxn9h3_c9XGcc7IDkyT81))/ProductListFiles/Generic%20Concrete%20Products%20with%20Portland%20Cement.pdf)>. Acessado em: 18/11/2013.
- BENTO, R. C.; ROSSIGNOLO, J. A. **Aplicação da Avaliação do Ciclo de vida (ACV) na análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado**. Concreto e construções IBRACON, p. 74- 81, jul./set. 2013.
- CALHEIRO, D. **Influência do uso de aditivos na moagem de cinzas de casca de arroz para sua adequação como co-produto**. São Leopoldo, 2011. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gerenciamento de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS. 2011.
- CARVALHO, J. **Análise de ciclo de vida ambiental aplicada a construção civil - estudo de caso: comparação entre cimentos Portland com adição de resíduos**. São Paulo, 2002. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2002.
- LIPPIATT, B. C. BEES 4.0: Building for Environmental for Economic Sustainability Technical Manual e User Guide. Gaithersburg, USA: National Institute of Standards and Technology. 327p. 2007.
- MEYER, C. The greening of the concrete industry. **Cement and Concrete Composites**, v. 31(8), p. 601-605, 2009.
- OLIVEIRA, A. S. **Análise ambiental da viabilidade de seleção de produtos da construção civil através da ACV e do software Bees 3.0**. Porto Alegre, 2007. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 2007.
- SILVA, N. I. Warpechowski da; CALARGE, L. M.; CHIES, F.; MALLMANN, J. E.; ZWONOK, O. Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico. **Cerâmica**, São Paulo, v. 45, n. 296, 1999.
- U.S. Department of the Interior - USGS. **Mineral commodity summaries 2013**. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey; 2013.
- WBCSD. The cement sustainability initiative: recycling concrete. In: Klee H editor. Geneva (Switzerland): **World Council for Sustainable Business Development**; 2009. p. 1–42.