

## **Influência das fontes de dados nas emissões de CO<sub>2</sub> e no indicador de mudanças climáticas da indústria cimenteira brasileira**

**Pedro Cesar R. A. Abrão**

*Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo, Brasil*  
[pedroabrao@usp.br](mailto:pedroabrao@usp.br)

**Daniel Costa Reis**

*Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo, Brasil*  
[danielreis@usp.br](mailto:danielreis@usp.br)

**Vanderley M. John**

*Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo, Brasil*  
[vmjohn@lme.pcc.usp.br](mailto:vmjohn@lme.pcc.usp.br)

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho consiste na comparação e quantificação da variabilidade da emissão do Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) considerando diferentes fontes de dados de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) dos cimentos brasileiros. Os dados foram levantados do Ecoinvent v3.2, do centro de dados *Getting the number rights* e dos relatórios de sustentabilidade das principais empresas da indústria cimenteira brasileira. Complementarmente, foi também quantificado a influência dos restantes gases, óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>) para cálculo do indicador mudanças climáticas (kgCO<sub>2</sub>eq) na metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Os resultados indicam que há uma variação significativa nas emissões de CO<sub>2</sub> mesmo dentro de cada classe de cimento em função das diferentes fontes de dados utilizadas no ICV. Analisando os gases de efeito estufa (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e NO<sub>x</sub>), constatou-se que o CO<sub>2</sub> representa 97,5% do potencial de mudança climática (kgCO<sub>2</sub>eq). Conclui-se então que a variação de emissão CO<sub>2</sub> entre fontes de dados é significativa, e que para a quantificação do potencial de mudanças climáticas, o CO<sub>2</sub> é o gás que mais influência na intensidade deste índice, indicando a possibilidade de desprezar os restantes gases.

**Palavras-chave** Variabilidade na emissão de CO<sub>2</sub>; Mudança climática; Indústria cimenteira brasileira.

## 1. INTRODUÇÃO

A produção de cimento representa cerca 8% das emissões de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) globais (Tait and Cheung 2016). Mantendo a atual rota tecnológica, esse valor tende a aumentar, em virtude da projeção de aumento na demanda por cimento. Face a este cenário, a indústria cimenteira está empenhada em reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> provenientes fundamentalmente da produção de clínquer através da decomposição do calcário e pela queima dos combustíveis fósseis utilizados nesse mesmo processo (Oliveira et al. 2014). Diminuir os níveis de produção de cimento não é uma opção viável do ponto de vista social, considerando a grande demanda na construção de edifícios e infraestruturas; portanto estratégias que permitam reduzir as emissões mantendo os níveis de produção adequados à demanda devem ser priorizadas.

Um elemento de grande relevância para se promover a sustentabilidade ambiental consiste na sensibilização dos consumidores para a aquisição de produtos com menor impacto ambiental. Porém, na indústria cimenteira brasileira, as informações sobre esses impactos ainda é limitada e, em termos comerciais, não permite ao consumidor selecionar os produtos em função do desempenho ambiental. A ACV é uma ferramenta que possibilita a análise da pegada ambiental de produtos durante todo o seu ciclo de vida (Van den Heede and De Belie 2012), bem como comparar os potenciais impactos ambientais de produtos com funções equivalentes, como por exemplo: o cimento.

Uma das categorias de impacto ambiental de maior relevo e comumente utilizada na ACV de produtos cimentícios é o potencial de mudança climática que está correlacionado com o aquecimento global provocada pelos Gases do Efeito Estufa (GEE), destacando-se o CO<sub>2</sub>. Na contabilização de inventário de ciclo de vida, as emissões de CO<sub>2</sub> é um parâmetro importante que, por sua vez, influencia o resultado final da ACV. No Brasil, pela ausência de uma base de dados nacional na etapa de inventário, pesquisadores e profissionais têm de recorrer a bases estrangeiras como o *Ecoinvent*, uma das mais populares, para obter dados relativos às emissões de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e NO<sub>x</sub>; também podem recorrer ao centro de dados "*Getting the Numbers Right*" (GNR) (WBCSD, 2014), que fornece dados médios provenientes diretamente da indústria cimenteira brasileira cuja abrangência é de 77% do setor; como terceira alternativa podem utilizar dados dos relatórios de sustentabilidade das empresas cimenteira brasileiras. Apenas os relatórios de sustentabilidade e o GNR fornecem dados primários.

Constatou-se que no Brasil existe apenas um estudo (Oliveira et al. 2014) avaliando as emissões de CO<sub>2</sub> oriundas da indústria cimenteira onde foram utilizados mais de uma fonte de dados; neste estudo também foram apresentadas as emissões de acordo com o fator de clínquer de cada cimento. Porém ainda não existe até o momento uma estimativa do impacto do uso destas diferentes fontes de informações.

A utilização da base de dados estrangeira e do centro de dados do GNR, conforme é proposto atualmente, influencia na comparação entre fabricantes distintos de um mesmo produto, privilegiando as empresas que se encontram acima do valor médio do mercado e prejudicam aquelas que se encontram abaixo. Partindo desta premissa, este artigo tem como primeiro objetivo realizar uma análise da influência da fonte de dados de emissão de

CO<sub>2</sub> utilizadas para o inventário do ciclo de vida dos principais tipos de cimentos comercializados no Brasil.

Por outro lado, no cálculo do indicador mudança climática é prática comum, na metodologia de ACV, contabilizar os restantes gases do efeito estufa como o Metano (CH<sub>4</sub>) e Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>), conforme sugerem as diretrizes do IPCC (2007). Porém, o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) está propondo, no âmbito da metodologia Avaliação do Ciclo de Vida Modular (ACVm), uma estimativa direta somente do CO<sub>2</sub> como um indicador da contribuição dos produtos ao aquecimento global. Novamente não existe uma quantificação do impacto desta decisão na cadeia de cimento. Assim, o segundo objetivo deste trabalho, consiste em quantificar a influência de limitar o inventário às emissões de CO<sub>2</sub>, negligenciando o CH<sub>4</sub> e NO<sub>x</sub>.

## 2. METODOLOGIA

A primeira etapa deste trabalho consistiu no levantamento das emissões líquidas de CO<sub>2</sub> através do banco de dados do *Ecoinvent* v3.2 considerando o processo *Rest of the World* (RoW), do GNR e dos relatórios de sustentabilidade de quatro empresas cimenteiras que, atualmente, operam no Brasil. Os nomes das empresas e o respectivo volume de produção de cimento não será apresentado neste trabalho para resguardar o seu anonimato. Foram avaliados os principais tipos de cimento brasileiros, nomeadamente, CPII-E, CPII-Z, CPII-F, CPIII, CPIV e CPV que, de forma conjunta, correspondem a mais de 99,5% da produção anual brasileira. Os documentos normativos brasileiros (NBR 11578) (NBR 5735) (NBR 5736) (NBR 5733) também se fizeram necessários para identificar as faixas de variação do fator clínquer dentro de cada tipo de cimento.

Para o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> para os diferentes tipos de cimento a alocação de emissão de CO<sub>2</sub> do processo produtivo dos materiais cimentícios suplementares foram considerados nulos, hipótese geralmente aceita e exposta na literatura científica (Damineli et al. 2010; Oliveira et al. 2014). Portanto tendo o conhecimento do teor médio de clínquer ( $k_m$ ) nos cimentos, a emissão de CO<sub>2</sub> do mesmo ( $C_m$ ) e o teor de clínquer do cimento analisado ( $k$ ) é possível estimar através da Equação 1 a emissão média de CO<sub>2</sub> para diferentes teores de clínquer ( $C$ ) (Oliveira et al. 2014), para diversas fontes de dados.

$$C = k \cdot C_m \cdot k_m^{-1} \quad (1)$$

Onde  $C$  = emissão média de CO<sub>2</sub>;  $k$  = teor de clínquer do cimento analisado;  $C_m$  = emissão de CO<sub>2</sub> para o teor de clínquer médio; e  $k_m$  = teor médio de clínquer.

A segunda etapa consistiu no levantamento dos restantes gases do efeito estufa (CH<sub>4</sub> e NO<sub>x</sub>) através do banco de dados do *Ecoinvent* 3.2 para os seguintes processos: i) *Rest of the world*; ii) Canadá; iii) Suíça; iv) Europa; v) Estados Unidos da América. Neste trabalho considerou-se um horizonte temporal de 100 anos. Segundo o IPCC (2007), o potencial de aquecimento global para 100 anos é 25 e 298 vezes maior, que o do CO<sub>2</sub>, para o CH<sub>4</sub> e NO<sub>x</sub>, respectivamente.

A Tabela 1 correlaciona os dados de inventário utilizados neste trabalho para primeiramente quantificar a variabilidade do CO<sub>2</sub> entre inventários, e depois utilizando apenas os dados do *Ecoinvent* para quantificar o peso do NO<sub>x</sub> e do CH<sub>4</sub> no cálculo do indicador de mudanças climáticas. Já a Tabela 2 apresenta os dados utilizados para as

análises feitas neste estudo, nomeadamente, fonte de dados, informações para o cálculo das emissões específicas de cada tipo de cimento, informações para o cálculo do indicador GWP e ano de origem dos dados.

Tabela 1. Bases de dados utilizadas para cálculo da variabilidade do CO<sub>2</sub> e quanto impacta essa variabilidade no GWP

Gases do Efeito Estufa (GEE)	Fonte de dados		
	<i>Ecoinvent</i>	Relatórios ambientais da Indústria	GNR - WBCSD
CO <sub>2</sub>	X	X	X
NO <sub>x</sub>	X	X	-
CH <sub>4</sub>	X	-	-

Tabela 2. Resumo dados utilizados para as análises feitas neste estudo

Fonte	Fator clínquer no cimento (k <sub>m</sub> )	Ano dos dados	Emissão de CO <sub>2</sub> específica líquida/t cimento (C <sub>m</sub> )	Emissão de CH <sub>4</sub> /t cimento	Emissão de NO <sub>x</sub> /t cimento	GWP 100 anos (KgCO <sub>2</sub> eq/t cimento)	Diferença entre CO <sub>2</sub> e GWP (%)
<b>Empresa 1</b>	72,90%	2014	566	0	1,59E-03	N/A	N/A
<b>Empresa 2</b>	74,70%	2014	643	0	1,98E-03	N/A	N/A
<b>Empresa 3</b>	72%	2014	572	0	1,36E-03	N/A	N/A
<b>Empresa 4</b>	69,80%	2014	575	0	1,60E-03	N/A	N/A
<b>GNR - WBCSD</b>	68,60%	2014	566	0	0	N/A	N/A
<b><i>Ecoinvent</i> (RoW)</b>	100%	2009	863	7,27E-01	1,42E-01	923	6,6
<b><i>Ecoinvent</i> v3.2 (Europa)</b>	100%	2014	839	8,88E-03	1,08E-03	840	0,1
<b><i>Ecoinvent</i> v3.2 (EUA)</b>	100%	2014	839	8,88E-03	1,08E-03	840	0,1
<b><i>Ecoinvent</i> v3.2 (Canada)</b>	100%	2011	855	6,10E-03	1,06E-02	858	0,4
<b><i>Ecoinvent</i> v3.2 (Suíça)</b>	100%	2009	775	5,68E-01	9,92E-02	819	5,3

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Influência das diferentes fontes de dados nas emissões de CO<sub>2</sub>

Os resultados da Figura 1 mostram a variabilidade das emissões de CO<sub>2</sub> para os vários tipos de cimento brasileiro em função da fonte de dados (média do GNR; processo RoW do *Ecoinvent*; e faixa de variação entre empresas brasileiras). Verifica-se que dentro de cada tipo de cimento, há uma variação nas emissões de CO<sub>2</sub> devido a fonte de dados utilizada.

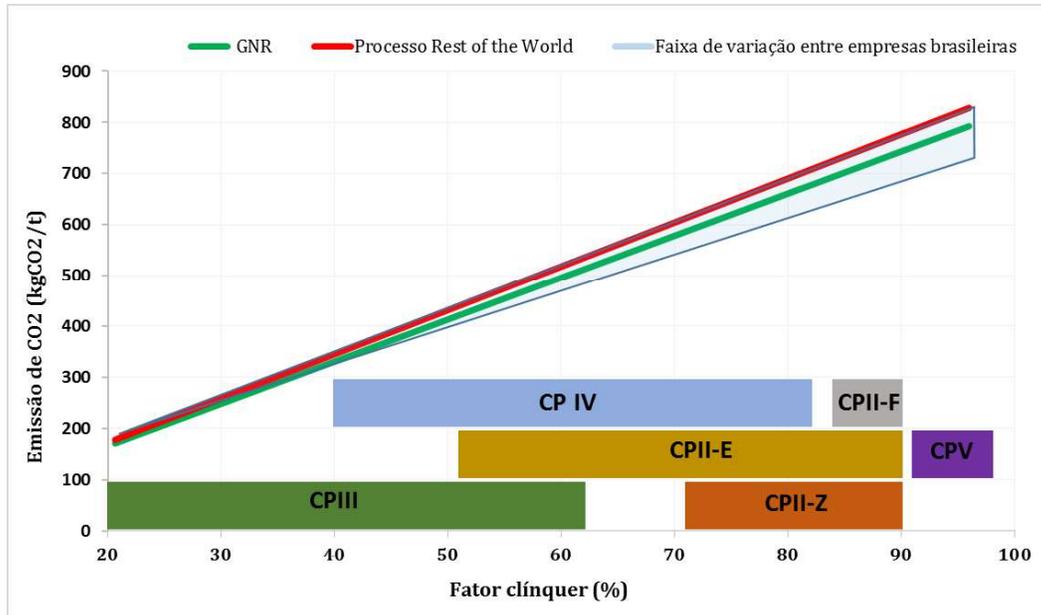


Figura 1. Emissão brasileira de CO<sub>2</sub> por fator clínquer permitido, por tipo de cimento e faixa de emissão dos inventários estudados

A Figura 2 ilustra as emissões líquidas de CO<sub>2</sub> na produção de clínquer utilizando as seguintes fontes de dados: *Ecoinvent* RoW, média do GNR e relatórios de sustentabilidade das indústrias cimenteiras brasileiras. Constata-se, mais uma vez, a variabilidade das emissões de CO<sub>2</sub> entre os diferentes inventários. Convém mencionar a boa eficiência das empresas cimenteiras brasileiras que, de fato, todas elas são melhores ou iguais aos padrões mundiais.

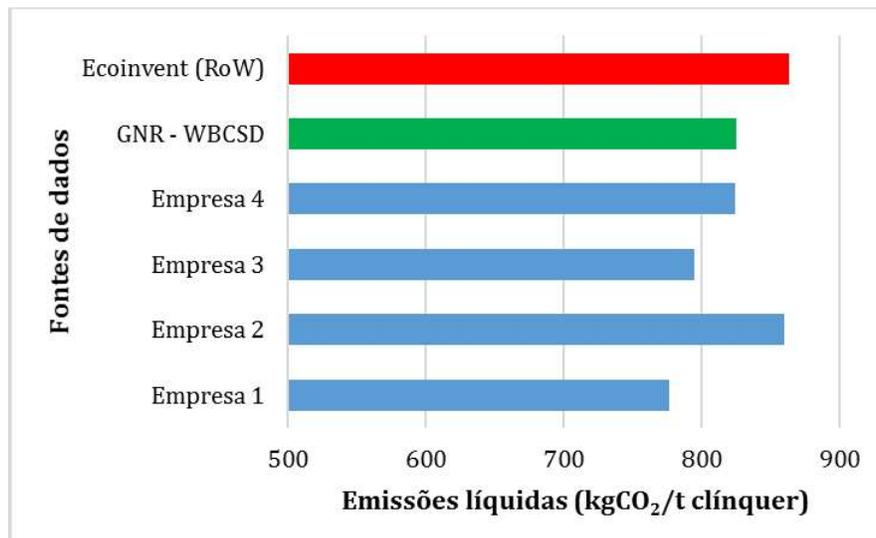


Figura 2. Variabilidade nas emissões líquidas de CO<sub>2</sub> em função dos inventários

A Figura 3 apresenta o impacto da fonte de dados (GNR e relatórios de sustentabilidade das empresas) utilizados nos inventários de ciclo de vida, e mostra a estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> associadas aos diferentes tipos de cimento, considerando a faixa de variação de clínquer admitida pela norma. Constata-se, por exemplo, no cimento CPV que para um fator

clínquer de 96%, a diferença nas emissões de CO<sub>2</sub> pode chegar aos 83kgCO<sub>2</sub>/t, dependendo da fonte de dados a ser analisada. Esta situação de variabilidade nas emissões de CO<sub>2</sub> demonstra que mesmo utilizando dados primários médios da indústria, conforme disponibilizado pelo GNR, existe uma variância na emissão de CO<sub>2</sub>, evidenciando que existe diferença entre empresas do mesmo setor. Quanto maior o fator de clínquer, maior o erro.

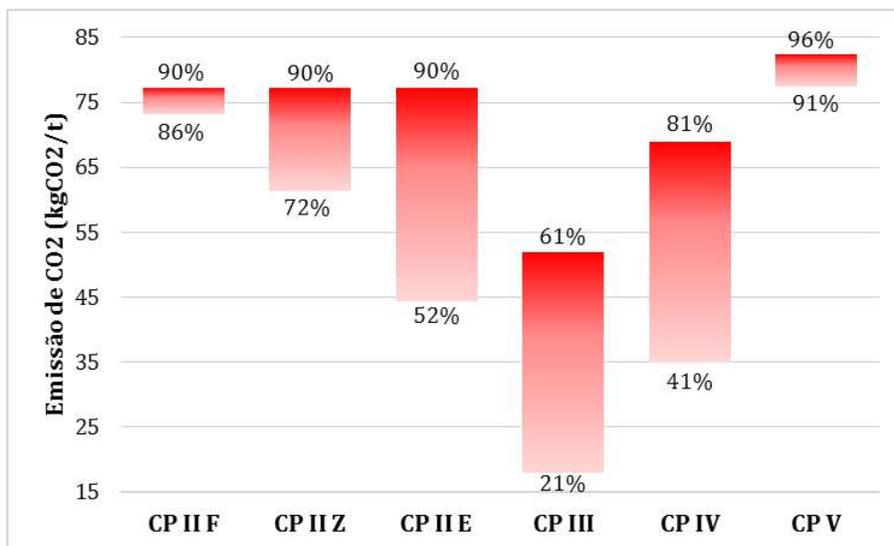


Figura 3: Impacto da fonte de dados utilizados nos inventários de ciclo de vida, e estimativa nas emissões de CO<sub>2</sub> associadas aos diferentes tipos de cimento, considerando a faixa de variação de clínquer admitida pela norma.

A Figura 4 ilustra a incerteza nas emissões de CO<sub>2</sub> para cada tipo de cimento, considerando a variabilidade no teor de clínquer admitido as diferenças entre as fontes de dados analisadas, GNR (média) e relatórios de sustentabilidade das indústrias. Por outras palavras, o gráfico representa a faixa de emissão de CO<sub>2</sub> relacionada a produção dos diferentes tipos de cimentos brasileiros de acordo o teor de clínquer que os mesmos apresentam. Esta faixa foi construída através da compilação de todos os dados provenientes das fontes de dados (Figura 1). Deste modo, qualquer cimento produzido no Brasil, de acordo com seu tipo, estará dentro destas faixas de emissão apresentadas na Figura 4.

Como se pode observar na Figura 4, o fator de clínquer no cimento é um parâmetro importante, mas não absoluto, na definição das emissões de CO<sub>2</sub> (Oliveira et al. 2014). Um cimento CPIII por exemplo pode apresentar maior emissão do que o cimento CPII-E; ou o cimento CPV produzido pela melhor empresa apresentar menor emissão comparando com o cimento CPII de qualquer tipo. Portanto para se fazer uma decisão quanto a utilização do cimento com menor emissão de CO<sub>2</sub> é necessário saber o teor de clínquer exato do mesmo.

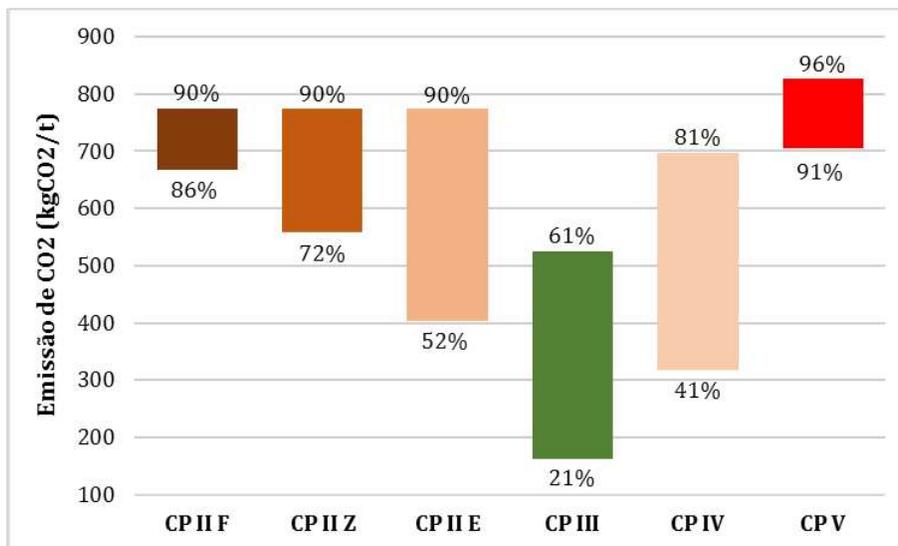


Figura 4: Emissões Líquidas de CO<sub>2</sub> para cada classe de cimento

### 3.2 Influência do CO<sub>2</sub> no indicador mudanças climáticas

O segundo objetivo deste trabalho consiste em averiguar a influência dos diferentes GEE no indicador de mudanças climáticas. Neste caso, apenas foi contabilizado a base de dados do *Ecoinvent*, mas considerando cinco processos: RoW, Europa, Estados Unidos da América (EUA), Canadá e Suíça. Como o GNR informa somente CO<sub>2</sub> e os relatórios de sustentabilidade das empresas não mencionam o metano, que o *Ecoinvent* identifica como sendo um dos GEE emitidos na produção de cimento, não foi possível fazer esta análise para dados primários brasileiros. A Figura 5 representa a contribuição em porcentagem de cada um dos GEE para o indicador mudanças climáticas.

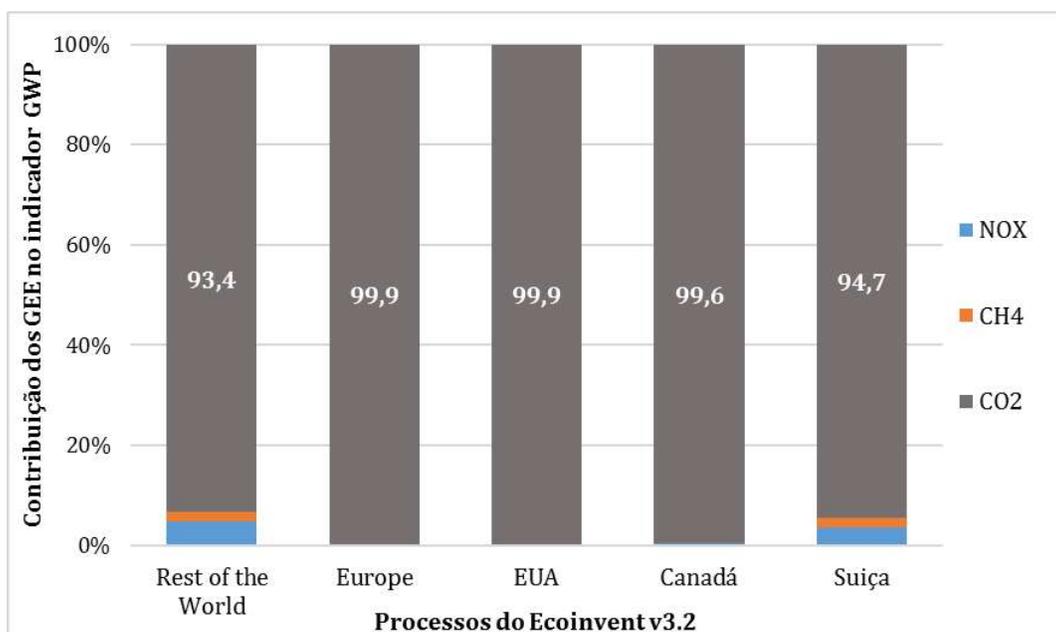


Figura 5. Contribuição dos GEE para o indicador mudanças climáticas

Analisando a Figura 5, facilmente se constata que o CO<sub>2</sub> é o principal GEE, sendo responsável, em média, por 97,5% no indicador mudanças climáticas. Esta situação indica que pouco se perde em termos de precisão quando se despreza os GEE que não o CO<sub>2</sub>, como é proposto pelo CBCS. A indústria cimenteira é uma das poucas a medir de forma contínua as emissões de NOx. No entanto, este fato certamente não é uma realidade em outros setores industriais, como a cerâmica. Por outro lado, não há registro de que alguma cadeia produtiva de materiais de construção no Brasil efetue medida de emissões de metano.

Coloca-se agora uma questão importante: conhecendo as emissões líquidas de CO<sub>2</sub> será possível estimar os restantes GEE? Para responder a esta questão procurou-se correlacionar o fator de emissão de CO<sub>2</sub> com o GWP. Os resultados são apresentados na Figura 6. Verifica-se que o GWP não é uma função linear do CO<sub>2</sub> e, como tal, não é possível ser estimado sabendo apenas o valor das emissões de CO<sub>2</sub>.

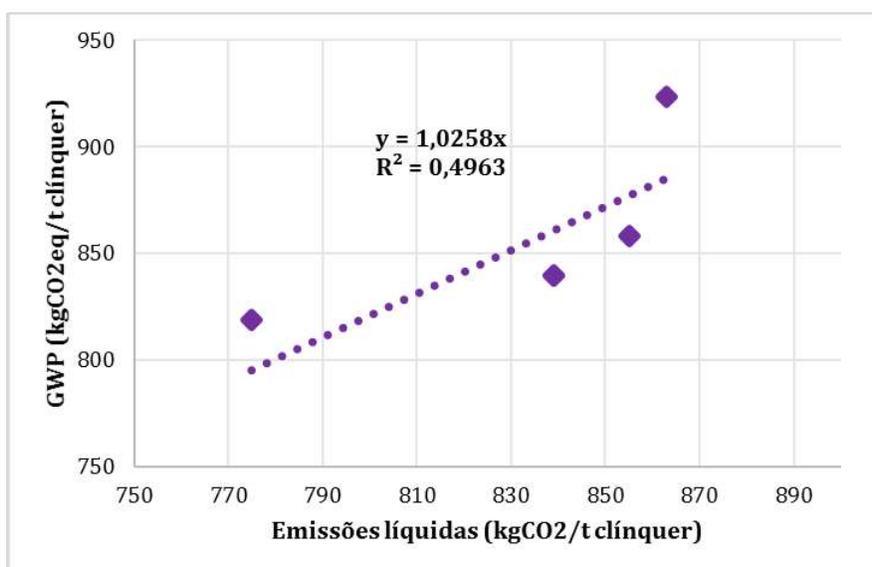


Figura 6. Correlação entre as emissões líquidas de CO<sub>2</sub> e o GWP

O cenário de variabilidade de emissões dentro de cada tipo de cimento vem reforçar a importância de cada empresa desenvolver uma declaração ambiental de seu produto (DAP). Este pode ser realmente o ponto crucial de todo o processo de sensibilização da indústria cimenteira no caminho a uma maior sustentabilidade ambiental do setor. Neste momento, no Brasil, já surgem algumas iniciativas neste sentido destacando-se o trabalho que vem sendo desenvolvido pela ACV Modular que procura, através da redução do escopo e privilegiando o uso de dados primários, avaliar o desempenho setorial das empresas para os aspectos ambientais mais relevantes.

É importante ainda ter em consideração que, a variabilidade nas emissões de CO<sub>2</sub>, não está apenas correlacionada ao processo de fabricação, mas também na localização geográfica da fábrica. Considerando que as concentrações de cinza volante e escória de alto forno são diferentes de região para região, fato que influencia na disponibilidade dos teores de substituição de clínquer nas diferentes empresas. Portanto, a comparação entre os produtos cimentícios de diferentes produtores deve ser realizada não só empregando dados primários, medidos diretamente em cada empresa, mas também dentro de um contexto regional onde se encontram. Nestes casos, a principal diferença na emissão de CO<sub>2</sub> estaria

atrelada a eficiência dos fornos para produção do clínquer, considerando que a faixa de incorporação de clínquer no cimento seria igual para todos os produtores.

#### 4 CONCLUSÕES

Neste artigo avaliou-se quantitativamente a variação das emissões do CO<sub>2</sub> entre as diferentes fontes de dados e qual o seu peso no indicador mudanças climáticas para os vários tipos de cimento brasileiro.

Verificou-se, em primeiro lugar, que existem diferenças significativas entre as emissões de CO<sub>2</sub> de diferentes empresas brasileiras. Esta constatação reforça a necessidade de uma Declaração Ambiental de Produto por empresa. Revela também a limitação do uso de base de dados que apresentam valores únicos para descrever cadeias industriais. Estas bases fornecem ao usuário uma falsa precisão e permitem comparações entre materiais diferentes, ignorando que as diferenças entre empresas podem ser até mais importantes. Esta prática além de igualar empresas com diferentes compromissos ambientais, falha em alertar o consumidor sobre o potencial de redução dos impactos ambientais pela simples seleção de fornecedores.

Assim, acreditamos que a utilização de dados inventariados diretamente (primários) da indústria e de forma individual é possível gerar indicadores que permitem promover a mitigação de impactos ambientais e, desta forma, aumentar a sustentabilidade na indústria cimenteira.

Verificou-se, em segundo lugar, que a simples medição do CO<sub>2</sub> reflete adequadamente o indicador mudanças climáticas para o caso de cimento. Deste modo, ao se desprezar os restantes gases com potencial de aquecimento global, se possibilita também a redução do escopo permitindo às empresas inventariar os seus dados de forma mais simples. Este cenário comprova a robustez da metodologia de ACV Modular que, em seu método de avaliação, propõem apenas inventariar dados primários de CO<sub>2</sub>.

#### 5 AGRADECIMENTOS

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento à pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

- Damineli, Bruno L., Fernanda M. Kemeid, Patricia S. Aguiar, and Vanderley M. John. 2010. "Measuring the Eco-Efficiency of Cement Use." *Cement and Concrete Composites* 32 (8): 555–62.
- Oliveira, Vanessa Carina Heinrichs Chirico, Bruno Luís Damineli, Vahan Agopyan, and Vanderley Moacyr John. 2014. "Strategies for the Minimization of CO<sub>2</sub> Emissions from Concrete." *Ambiente Construído* 14 (4): 167–181.
- Tait, Michael W., and Wai M. Cheung. 2016. "A Comparative Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Three Concrete Mix Designs." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (6): 847–60.
- Van den Heede, P., and N. De Belie. 2012. "Environmental Impact and Life Cycle Assessment (LCA) of Traditional and 'green' Concretes: Literature Review and Theoretical Calculations." *Cement and Concrete Composites* 34 (4): 431–42.

World business council for sustainable development (WBCSD). Getting the numbers right project. 2014. Geneva. Disponível em: <<http://www.wbcsdcement.org/GNR-2013/index.html>>. Acesso em: 15 mai. 2016.

Lafarge. Sustainability report 2014. São Paulo. Disponível em: <<http://www.lafarge.com/en/sustainability-report>>. Acesso em: 15 mai. 2016.

Intercement. Relatório Anual 2014. São Paulo. Disponível em: <<http://www.intercement.com/sites/ra2014/inovacao-e-sustentabilidade.php>>. Acesso em: 30 mai. 2016.

Holcim. Corporate Sustainable Development Report 2014. São Paulo. Disponível em: <<http://www.holcim.com/sustainable.html>>. Acesso em: 15 mai. 2016.

Votorantim. Relatório de sustentabilidade 2014. São Paulo. Disponível em: <<http://www.votorantim.com.br/ptbr/responsabilidadeSocialCorporativa/Paginas/relatorios.as>>. Acesso em: 20 mai. 2016.

Intergovernmental panel on climate change (IPCC). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. 2007. Cambridge. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4\\_wg2\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4_wg2_full_report.pdf)>. Acesso em: 03 jun. 2016.