2020 ENTAC
XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais

Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA DO CIMENTO BRASILEIRO: META-ANÁLISE DE DADOS NACIONAIS [1]

LIRA, Julia (1); ASSIS, André (2)

(1) Instituto Federal do Piauí (IFPI), julia.lira@ifpi.edu.br
(2) Universidade de Brasília (UnB), aassis@unb.br

RESUMO

Com as medidas propostas pelo governo brasileiro em reduzir as emissões de gases de efeito estufa e incluir maior participação de matriz energética renovável em seus processos, a indústria do cimento no Brasil apresenta um grande potencial para atingir o objetivo. Este material de construção possui elevado valor de consumo energético e emissões de CO_2, tanto oriundas da sua produção em si, quanto na queima de combustíveis fósseis para combustão. Para avaliar o potencial sustentável do cimento, uma ferramenta adequada é a Avaliação do Ciclo de Vida do material. Dentre suas etapas, uma delas consiste na coleta de dados de entrada e saída dos processos, denominada Inventário de Ciclo de Vida (ICV). O objetivo desta pesquisa é convergir os dados encontrados na literatura científica do Brasil a respeito dos impactos do cimento brasileiro para compor um intervalo de confiança desses valores que podem ser utilizados em pesquisas futuras. O resultado apresentou uma maior dispersão nos valores das amostras de energia incorporada e emissões de CO_2 do CP II e CP IV.

Palavras-chave: *Inventário de ciclo de vida. Cimento. Estatística.*

ABSTRACT

With measures adopted by the Brazilian government to reduce greenhouse gases including greater participation of the renewable energy matrix in its processes, a cement industry in Brazil has great potential to achieve the objective. This building material has high energy consumption and CO_2 emissions, both from its production itself and from burning fossil fuels for combustion. To assess the sustainable potential of cement, an appropriate tool is the assessment of the material's life cycle. Among its steps, one of them consists in the collection of input and output data from processes, called Life Cycle Inventory (ICV). The objective of this research is to converge the data found in the scientific literature of Brazil and to respect the impacts of Brazilian cement to compose a confidence interval of these values that can be used in future research. The result showed greater dispersion in the values of the samples of the embodied energy and CO_2 emissions from CP II and CP IV.

Keywords*: Life cycle inventoty. Cement. Statistic.*

[1] LIRA, Julia; ASSIS, André. Inventário de ciclo de vida do cimento brasileiro: meta-análise de dados nacionais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com a pauta de preocupação do aquecimento global (que ocorre pela concentração de gases de efeito estufa - GEE[2]), a indústria do cimento se tornou um alvo com grande potencial para promover significativas reduções, entre elas: adições de subprodutos ao cimento, utilização de combustíveis alternativos para queima, filtros e créditos de carbono. No Brasil, a produção de cimento correspondeu a, aproximadamente, 30% das emissões de GEE de todo o setor industrial no ano de 2012 (BRASIL, 2014). Isso demonstra que aplicações nesta indústria têm alto potencial para reduzir de forma eficiente as emissões no país.

Para Scrivener e Kirkpatrick (2008), a pressão crescente para inovação, com o intuito de melhorar a sustentabilidade, se deve ao fato de a produção de cimento representar de 5-8% das emissões de CO_2 feitas pelo homem. Portanto, este setor industrial está atualmente comprometido com a redução de emissões e outros impactos ambientais que surgem durante o processo de fabricação de cimento (ISHAK e HASHIM, 2015).

Para Assi *et al*. (2016), encontrar alternativas ao cimento Portland é de extrema importância devido aos altos níveis de emissão de dióxido de carbono associados ao seu processo de fabricação. Segundo Hossain *et al*. (2017), parte das emissões de CO_2 provém da combustão de combustíveis fósseis e outra parte é emitida a partir da calcinação de calcário.

Para avaliar todos os processos fabris, é aconselhável a realização de uma avaliação do ciclo de vida (ACV) do cimento brasileiro. Segundo a ABNT NBR ISO 14040: 2009, a ACV é uma metodologia no qual o produto ou processo é avaliado em todo o seu ciclo de vida. Dentre as fases de uma ACV, a análise de inventário é denominada por inventário de ciclo de vida (ICV).

A etapa de inventário do ciclo de vida (ICV) é a identificação e quantificação dos *inputs* (consumo de recursos) e *outputs* (emissões geradas) ambientais associados a um produto em todo o seu ciclo de vida. Segundo a ABNT NBR ISO 14040: 2009, a análise de inventário envolve a coleta de dados e os procedimentos de cálculo para quantificar entradas e saídas relevantes de um sistema de produto. As descrições da qualidade dos dados são importantes para entender a confiabilidade dos resultados do estudo e interpretar corretamente o resultado.

Após a coleta dos dados, os mesmos são convertidos ou traduzidos em impactos ambientais. Em uma ACV completa, vários são os impactos contabilizados e gerados por determinado material ou processo. No contexto desta pesquisa, apenas o consumo energético e as emissões de gás carbônico foram analisadas.

Muitas adaptações foram feitas para a realização da ACV. Uma delas é a análise híbrida, que consiste em utilizar dados de processo sempre que disponíveis para preencher as lacunas do sistema com os dados de entrada-saída, a fim de avaliar inteiramente a cadeia de um produto (CHAU *et al*., 2015). Essa alternativa é uma simplificação que utiliza dados secundários.

A pesquisa de Oliveira (2015) foi pioneira na ACV modular e calculou cinco indicadores de blocos de concreto brasileiros: consumo de materiais, energia incorporada, emissão de CO_2, água e geração de resíduos. A autora concluiu que o

[2] Os gases de efeito estufa são representados pela equivalência de CO_2, considerando sua maior importância e representatividade para o aquecimento global provocado pela concentração de GEE na atmosfera.

cimento é um item responsável por uma parcela significativa do CO_2 e de energia incorporada dos blocos estudados e que a quantidade de cimento utilizada no produto final é o principal fator relacionado às emissões e ao gasto de energia.

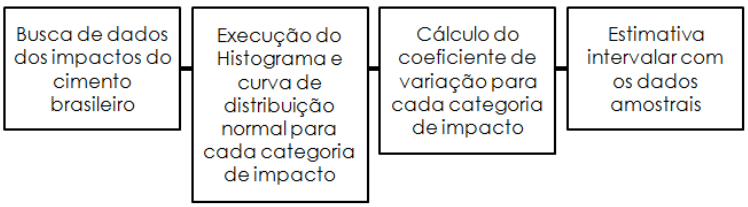
A primeira Declaração Ambiental de Produto (DAP) de um cimento foi feita em 2016 pela empresa Votorantim. A unidade funcional foi de 1 m³ de tonelada de cimento considerando a fronteira de estudo do berço ao portão. A DAP foi feita para os tipos de cimento produzidos pela empresa e o CP II E 40 foi o que apresentou menor valor de emissão de CO_2, por exemplo. Isso está diretamente relacionado com a quantidade de substituição do clínquer por resíduos (fíler calcário, escória de alto forno, entre outros). Com a apresentação dessas duas pesquisas, tem-se que a energia incorporada e emissões de CO_2 do cimento podem ser alteradas se for alterada a quantidade de clínquer e a fonte de combustível. Já no caso de impacto ambiental de concreto, a quantidade de cimento que é utilizada também é fator decisivo, já que podem ser encontradas substituições para tal.

O objetivo deste trabalho é compilar as informações existentes na produção científica brasileira em relação aos impactos ambientais do cimento por meio de uma análise estatística, buscando encontrar um intervalo de confiança e, assim, minimizar o erro dos valores registrados em pesquisas anteriores.

2 METODOLOGIA

A metodologia foi realizada por etapas (Figura 1). A primeira delas foi busca e seleção de dados nacionais referentes aos valores de inventário do ciclo de vida do cimento, que foram: energia incorporada e emissões de CO_2. As informações se restringiram ao cimento brasileiro e à produção científica nacional que trataram de estudos de diferentes tipos de cimento (CP II, CP III, CP IV e CP V). A busca foi feita por meio de revisão sistemática da literatura nacional em fonte de repositório nacional de teses e dissertações, artigos publicados em eventos e periódicos.

Figura 1 – Etapas da metodologia



Fonte: Autores (2019)

Com os dados, considerados amostrais, foi realizado o cálculo da quantidade de classes e a frequência de cada uma para realização do histograma. Com o auxílio do Microsoft Office Excel, a amostra-base transformou-se em uma amostra padrão com cem elementos com as mesmas características. Isto é necessário para obter a distribuição normal com uma curva mais exata e, assim, uma comparação igualitária em termos de qualidade de dados.

O coeficiente de variação (CV) também foi encontrado por meio da Equação 1, já que se mostra como uma forma de avaliar a dispersão dos dados. Quanto maior o coeficiente, maior o desvio padrão e maior a dispersão da amostra.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} 100\% \quad (1)$$

Onde: σ = desvio padrão; μ = média amostral.

A estimativa intervalar foi calculada com base nos limites superior e inferior em relação à média, sendo estes conforme apresentados na Equação 2. Considerando o nível de confiança adotado igual a 95%. A equação foi escolhida por ser uma distribuição de *student* (inferior a 30 elementos em cada amostra), porém considerando que a população é normal com desvio padrão desconhecido.

$$[\bar{X} - t_{\frac{\alpha}{2}}\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right) ; \bar{X} + t_{\frac{\alpha}{2}}\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)] \quad (2)$$

Onde: $\overline{X}$ = média aritmética dos elementos da amostra; *t* = variável normal padronizada; no caso da amostra ter menos de 30 elementos, utiliza-se a variável da distribuição de *Student*; s = desvio padrão; n = quantidade de elementos da amostra.

3 ANÁLISE DE RESULTADOS

As amostras encontradas foram separadas por categoria de impacto, conforme apresentado na Tabela 1. Em se tratando de energia incorporada ao processo fabril, não foram constatadas diferenças em relação ao tipo de cimento em várias referências, por isso foi feita a categoria única de energia incorporada para cimento Portland, sem especificar os tipos. Diferentemente das emissões de CO_2, que envolve o tempo de forno (maior queima de combustíveis fósseis) e quantidade de emissões pela calcinação, variando por tipo de cimento e sendo necessária uma divisão.

Tabela 1 – Organização das amostras encontradas

Simplificação da ACV (categoria de impacto analisada)	**Produto**
Energia incorporada	Cimento Portland
Emissões de CO_2	CP II
Emissões de CO_2	CP III
Emissões de CO_2	CP IV
Emissões de CO_2	CP V - ARI

Fonte: Autores (2019)

3.1 Energia incorporada do cimento Portland

Os valores de energia incorporada para o cimento brasileiro foram retirados das pesquisas de Tavares (2006), Oliveira (2015), Silva e Silva (2015) e DAP (VOTORANTIM, 2016), totalizando 19 amostras. Como citado na metodologia, a distribuição foi transformada em uma distribuição normal com cem amostras, para ajustes de valores e melhor comparação. As características da amostra encontrada na produção científica brasileira estão apresentadas na Tabela 2. Contém informações como média, desvio padrão e informações extraídas da tabela de distribuição '*t-student*' foram necessárias para a composição do intervalo de confiança.

Tabela 2- Características das amostras de Energia incorporada

Média	2939,7 MJ/ton
Desvio padrão	1164,24 MJ/ton
Elementos da amostra (n)	19
Graus de liberdade	$\upsilon = 18$

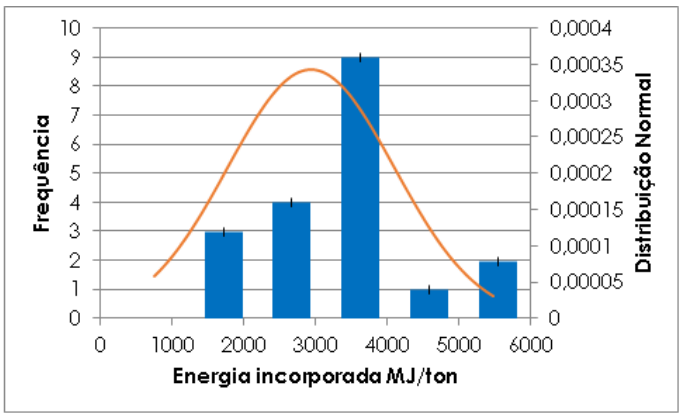
	α = 95% t = 2,101

Fonte: Autores (2019)

As amostras tinham diferenças nas unidades funcionais, variando entre MJ/kg e MJ/t e o ajuste foi feito. Pela pequena variação entre os valores de energia incorporada de acordo com os diferentes tipos de cimento, optou-se por adotar apenas uma categoria de impacto para energia incorporada do cimento Portland.

O histograma e a distribuição normal estão apresentados na Figura 2 para energia incorporada. É importante ressaltar que os valores do eixo x são os valores de corte de cada classe. Com a distribuição normal foi possível comparar os valores amostrais de cada categoria. Observou-se que a curva de energia incorporada possui maior frequência em torno da média. Isso demonstra melhor qualidade dos dados, direcionando a amostra para uma distribuição normal de probabilidade.

Figura 2 – Histograma com distribuição normal de energia incorporada do cimento



Fonte: Autores (2019)

3.2 Emissões de CO_2 para diversos tipos de cimento

A busca de dados oriundos da produção científica brasileira acerca do tema resultou em diferentes valores que compuseram a amostra e foram encontrados nas pesquisas de: Bessa (2012), Oliveira (2015), Silva e Silva (2015), Oliveira *et al*. (2014), Costa (2012), Campos (2012), Lima (2010) e Brasil (2013). As características das amostras coletadas por tipo de cimento estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3- Características das amostras de emissão de CO_2

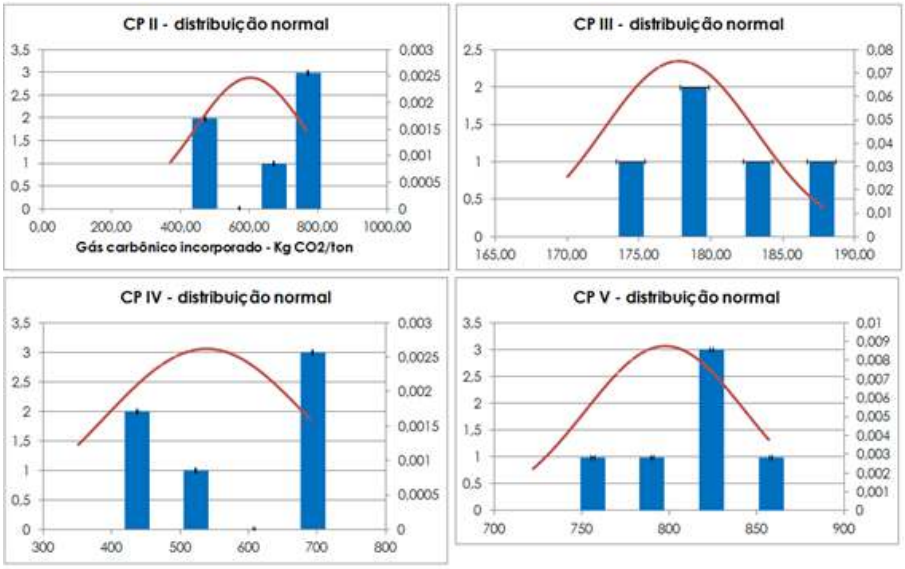
CP II	
Média	602 $KgCO_2$/ton
Desvio padrão	161,28 $KgCO_2$/ton
Elementos da amostra (n)	6
Graus de liberdade	υ = 5
α = 95%	t = 2,571
CP III	
Média	177,79 $KgCO_2$/ton
Desvio padrão	5,32 $KgCO_2$/ton
Elementos da amostra (n)	5
Graus de liberdade	υ = 4
α = 95%	t = 2,776
CP IV	
Média	537,97 $KgCO_2$/ton
Desvio padrão	151,83 $KgCO_2$/ton
Elementos da amostra (n)	6

Graus de liberdade	υ = 5
a = 95%	t = 2,571
CP V - ARI	
Média	797,46 $KgCO_2$/ton
Desvio padrão	45,54 $KgCO_2$/ton
Elementos da amostra (n)	6
Graus de liberdade	υ = 5
a = 95%	t = 2,571

Fonte: Autores (2019)

Os histogramas e a distribuição normal estão apresentados na Figura 3 para emissão de CO_2 para cada tipo de cimento.

Figura 3- Histograma com distribuição normal de emissão de CO_2



Fonte: Autores (2019)

3.3 Intervalo de confiança

O coeficiente de variação para cada categoria está apresentado na Tabela 4. O maior coeficiente de variação é o da energia incorporada do cimento, chegando a quase 40%. O menor CV é o do CP III para emissões de CO_2. Ou seja, os dados sofrem pequena variação e possuem menor dispersão, sendo assim mais confiáveis.

Tabela 4- Coeficiente de variação das categorias de impacto

Energia Incorporada		39,60%
Emissões de CO_2	CP II	26,79%
	CP III	3,00%
	CP IV	28,00%
	CP V	6,00%

Fonte: Autores (2019)

Com as equações apresentadas no item 2, o intervalo de confiança foi encontrado (Tabela 3), considerando uma distribuição de *student* pela quantidade de elementos amostrais. A grande disparidade entre os limites inferior e superior coincide com os maiores valores de desvio padrão, demonstrando uma baixa qualidade dos dados encontrados.

Para a categoria de emissão de CO_2, tanto para o CP III quanto para o CP V, o intervalo de confiança possui pouca variação, já que possuem baixo CV (menos que 10%). Observa-se que o CP III é o tipo de cimento com menores emissões de CO_2, ao contrário do CP V que emitem mais. Independente do tipo de cimento, a indústria cimenteira possui elevado consumo energético, sendo amenizada pela fonte energética majoritariamente limpa do Brasil, mas que demonstra grande potencial para intervenções.

Tabela 3- Intervalo de confiança das categorias de impacto.

Categoria	Intervalo de confiança
Energia incorporada	(2378,57 ; 3500,90)
Emissões de CO_2 (CP II)	(432,72 ; 771,28)
Emissões de CO_2 (CP III)	(171,19 ; 184,39)
Emissões de CO_2 (CP IV)	(378,61 ; 697,32)
Emissões de CO_2 (CP V)	(749,66 ; 845,25)

Fonte: Autores (2019)

O CP III possui o menor valor de emissão de CO2, seguido pelo CP IV e CP II. A explicação está relacionada diretamente com a porcentagem de adição, que são definidos normativamente (CBCS, 2015).

4 CONCLUSÕES

O CP III foi o tipo de cimento que teve menores emissões de CO_2 incorporadas, visto que o alto teor de adição de escória granulada de alto forno possibilita a redução de clínquer no cimento. Já o CP V foi o que apresentou maiores valores de emissões, por se tratar de um cimento de alta resistência inicial requer maior tempo de forno e maior quantidade de clínquer no cimento.

Com o resultado da estimativa intervalar das amostras é possível direcionar as futuras pesquisas e a composição de um banco de dados de impactos ambientais de materiais de construção, especialmente de maneira educativa. As diferenças na metodologia de cada referência utilizada pode ser uma variável na comparação de duas pesquisas distintas.

REFERÊNCIAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14040. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

ASSI, L.; DEAVER, E; ELBATANOUNY, M.; ZIEHL, P. Investigation of early compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 112, p.807-815, 2016.

BESSA, V. **Contribuição à metodologia de avaliação das emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida das fachadas de edifícios de escritórios**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 286 p., 2010.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima, **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 2013. Brasília.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima, **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 2014. Brasília.

CAMPOS, F. H**. Análise do ciclo de vida na construção civil**. Dissertação de mestrado, Programa de pós-graduação em construção civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 123 p., 2012.

CBCS CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. Projeto Avaliação de Ciclo de Vida Modular de Blocos e Pisos de Concreto. Coordenador Vanderley John. 2015.

CHAU, C.; LEUNG, T.; NG, W. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. **Applied Energy**, v. 143, p.395-413, abr. 2015.

COSTA, B. L. **Quantificação das emissões de CO_2 geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 208 p., 2012.

EPD. Product Category Rules - UN CPC 375 – Cement (Votorantim Cimentos). The International EPD®System. 2016.

HOSSAIN, M.; Poon, C.; LO, I.; CHENG, J. Comparative LCA on using waste materials in the cement industry: A Hong Kong case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 120, p.199-208, 2017. Elsevier BV.

ISHAK, S. A.; HASHIM, H. Low carbon measures for cement plant – a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p.260-274, 2015.

LIMA, J. A. R. **Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas**. Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 151 p., 2010.

OLIVEIRA, L. S. **Avaliação do ciclo de vida de blocos de concreto do mercado brasileiro: alvenaria e pavimentação**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 156 p., 2015.

OLIVEIRA, V. C.; DAMINELI, B. L.; AGOPYAN, V.; JOHN, V. Estratégias para a minimização da emissão de CO_2 de concretos. **Ambiente Construído**, v. 14, p. 167-181, 2014.

SCRIVENER, K. L.; KIRKPATRICK, R. J. Innovation in use and research on cementitious material. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 2, p.128-136, fev. 2008.

SILVA, V. G.; SILVA, M. G. Seleção de materiais e edifícios de alto desempenho ambiental. In: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Cap. 5. p. 129-151.

TAVARES, S. F. **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energética de Edificações Residenciais Brasileiras.** Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.