



EIXO TEMÁTICO:

- Ambiente Construído e Sustentabilidade
- Arquitetura da Paisagem
- Cidade, Paisagem e Ambiente
- Cidades Inteligentes e Sustentáveis
- Engenharia de Tráfego, Acessibilidade e Mobilidade Urbana
- Meio Ambiente e Saneamento
- Patrimônio Histórico: Temporalidade e Intervenções
- Projetos, Intervenções e Requalificações na Cidade Contemporânea

**Aplicação da avaliação do ciclo de vida na produção de aglomerantes
ativados alcalinamente: uma revisão**

Application of life cycle assessment of alkali-activated binders production: a review

*Aplicación de la evaluación del ciclo de vida en la producción de aglomerantes alcalinos
activados: una revisión*

Thássia Dias Zanardo Rufato

Graduanda, UNESP, Brasil.
thatazanardo98@gmail.com

Camila Cassola Assunção

Mestranda, UNESP, Brasil.
camila.cassola.assuncao@gmail.com

Mauro Mitsuuchi Tashima

Professor Doutor, UNESP, Brasil.
mauro.tashima@unesp.br

RESUMO

Com o constante interesse de pesquisadores em buscar alternativas sustentáveis aos produtos da construção civil, destacam-se aqueles que obtêm sucesso comprovado cientificamente a partir do uso de metodologias para a contabilização da real contribuição de suas alternativas para o meio ambiente. Visto a crescente produção de artigos científicos relacionados à confecção de aglomerantes ativados alcalinamente (AAA) e geopolímeros, e o destaque destes relacionado com a obtenção de materiais com boas propriedades físicas e mecânicas capazes de substituir aqueles comuns confeccionados com cimento Portland, mostra-se importante à utilização da metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV), capaz de quantificar, por meio da identificação de um sistema produtivo, as saídas, em forma de categorias de impacto ambiental. Assim, observa-se a importância de estudar os métodos e fontes de dados disponíveis a estes pesquisadores, visto a grande variedade de materiais, muitas vezes não convencionais, como resíduos agroindustriais, utilizados em estudos de AAA e a verificação da necessidade de incentivo para estudos de ACV relacionados a este tema para que, cada vez mais, estes pesquisadores encontrem dados e ferramentas necessárias para avaliação do desempenho ambiental de seus trabalhos. Assim, a presente pesquisa busca realizar uma revisão da literatura sobre estudos de ACV em AAA e geopolímeros, identificando as ferramentas utilizadas por estes, bem como os resultados e pontos cruciais em seu processo produtivo, comparando-os com materiais convencionais de construção civil.

PALAVRAS-CHAVE: Avaliação do ciclo de vida. Aglomerantes ativados alcalinamente. Geopolímeros.

ABSTRACT

With the constant interest of researchers in looking for sustainable alternatives to civil construction products, those who have scientifically proven to be successful based on the use of methodologies for the real contribution of their alternatives to the environment are highlighted. Seen the growing production of scientific articles related to the alkaline-activated binders (AAB) and geopolymers manufacture, and the highlight of these materials in obtaining good physical and mechanical properties, been capable of replacing the common materials made with Portland cement, it is important the use of life cycle assessment methodology (LCA), that can quantify the outputs of a productive system in the form of environmental impact categories. Thus, the importance of studying the methods and the sources of data available to the researchers is observed, given the large variety of materials, sometimes not conventional, such as agro-industrial waste, that are used in AAB studies and the need for LCA studies incentive related to this theme so that, increasingly, these researchers find the necessary data and tools to perform the environmental assessment of their works. Thus, the present search seeks to perform a literature review on LCA studies in AAB and geopolymers, identifying the tools that were used by the researchers, as well as the results and crucial points in their productive process, comparing AAB and geopolymers with conventional civil construction materials.

KEYWORDS: Life cycle assessment. Alkali-activated binders. Geopolymers.

RESUMEN

Con el constante interés de los investigadores en buscar alternativas sostenibles a los materiales de construcción, destacamos aquellos que han demostrado ser científicamente exitosos mediante el uso de metodologías cuantitativas de la real contribución de sus alternativas al medio ambiente. En vista de la creciente producción de artículos científicos relacionados con la fabricación de conglomerantes alcalinos activados (CAA) y geopolímeros, y lo más destacado de estos relacionados con la obtención de materiales con buenas propiedades físicas y mecánicas capaces de reemplazar el cemento Portland, es importante el uso de la metodología de evaluación del ciclo de vida (LCA), que escapa de cuantificar, a través de la identificación de un sistema de producción, los resultados, en forma de categorías de impacto ambiental. Por lo tanto, es importante estudiar los métodos y las fuentes de datos disponibles para estos investigadores, dada la gran variedad de materiales, a menudo poco convencionales, como los residuos agroindustriales, utilizados en los estudios de CAA y la verificación de la necesidad de incentivos para los estudios. Los LCA se relacionan con este tema para que, cada vez más, estos investigadores encuentren los datos y las herramientas necesarias para evaluar el desempeño ambiental de su trabajo. Por lo tanto, esta investigación busca revisar la literatura sobre estudios de LCA en CAA y geopolímeros, identificando las herramientas utilizadas por ellos, así como los resultados y puntos cruciales en su proceso de producción, comparándolos con materiales de construcción convencionales.

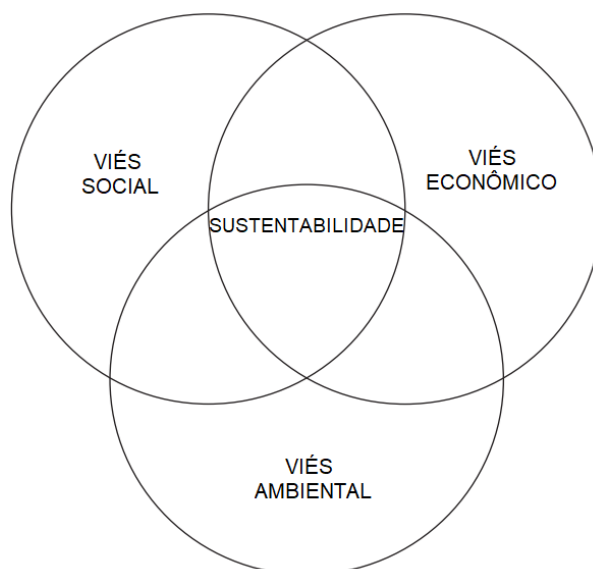
PALABRAS CLAVE: Evaluación del ciclo de vida. Ligantes activados alcalinamente. Geopolímeros.

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil apresenta uma enorme influência sobre a economia dos países, no Brasil, por exemplo, foi responsável por 4,5% do Produto Interno Bruto (PIB) no ano 2018, conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2019). Dessa forma, segundo Passuello *et al* (2014), o desenvolvimento econômico da nação está relacionado ao crescimento da demanda habitacional, sendo este, portanto, um quesito muito almejado.

Além de contribuir significativamente com a economia dos países, a construção civil está intimamente ligada aos impactos ambientais dos mesmos, ocasionando de 40% a 70% dos resíduos sólidos e 10% das emissões mundiais dos gases de efeito estufa (GEE), segundo Medeiros, Durante e Calejas (2018). Dessa forma, surge uma problemática em relação a atender tanto as exigências do setor econômico, como a preservação do meio ambiente, resumindo a busca por soluções que promovam um desenvolvimento sustentável, ou seja, capaz de suprir as necessidades atuais sem prejudicar as futuras, conforme as Nações Unidas (1987). Nesse sentido, a concepção de sustentabilidade se encontra ilustrada na Figura 1.

Figura 1 – Visão holística de sustentabilidade



Fonte: Adaptado de AÏTCIN e MINDESS, 2011.

Ao analisar a construção civil, tem-se que a mesma pode ser dividida em quatro fases, sendo estas, produção da matéria-prima, em que são considerados extração, transporte e manufatura da matéria-prima; construção, a qual inclui o transporte até o canteiro de obras, construção e instalação das mesmas; uso, abordando reposições, manutenções e consumo de energia e água; e fim de vida, ou seja, demolição, desconstrução, disposição dos resíduos e reciclagem. (PASSUELLO *et al.*, 2014; MEDEIROS, DURANTE e CALEJAS, 2018)

Dessa forma, Ochoa, Hendrickson e Matthews (2002) determinaram em seu estudo que a fase da construção apresentou maior contribuição em relação às emissões dos GEE e às gerações de resíduos, com 57% e 51%, respectivamente. Porém, é importante ressaltar que os mesmos consideram como integrantes dessa fase os processos de obtenção de matérias-primas, fabricação, transporte até a obra e construção real dos edifícios, ou seja, seria equivalente a uma junção das fases de produção da matéria-prima com a de construção, definidas por Medeiros, Durante e Calejas (2018).

Considerando-se, no contexto da construção civil, apenas as emissões dos GEE, como o dióxido de carbônico (CO₂), pode-se destacar as parcelas referentes ao transporte dos produtos e aos processos produtivos dentro da indústria cimenteira, a qual visa atender à elevada demanda de concreto, já que este é o material mais consumido no mundo, após a água, conforme Aïtcin e Mindess (2011).

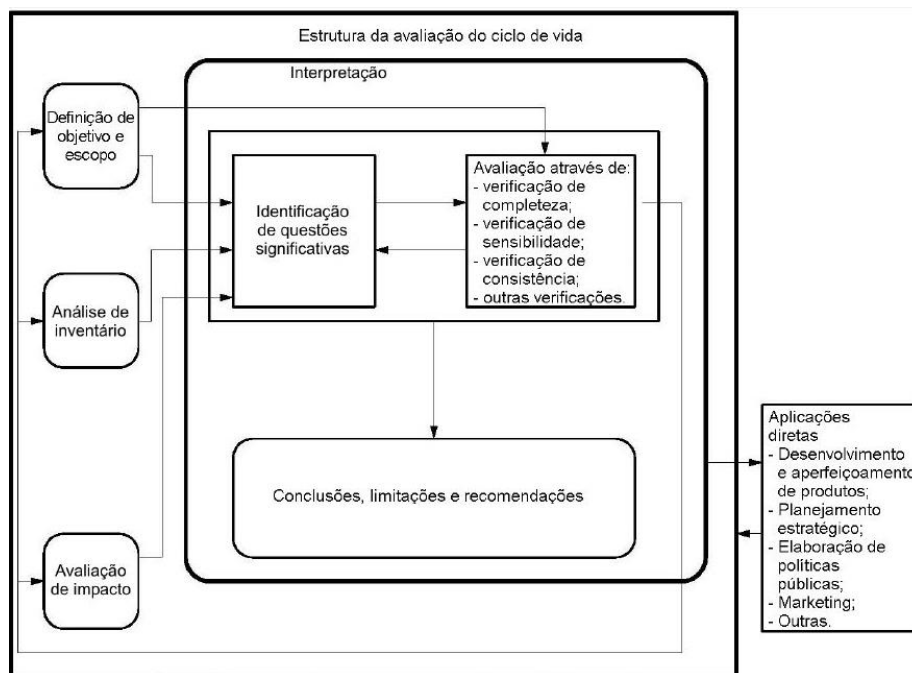
Apenas no Brasil, no período de julho de 2018 a junho de 2019, foram produzidos e comercializados 53 milhões de toneladas de cimento. (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO - SNIC, 2019). A problemática surge durante a fabricação deste, na qual se faz uso de uma quantidade elevada de energia, promovendo uma considerável emissão de CO₂ para a atmosfera. Dessa forma, de acordo com Mehta e Monteiro (2008), aproximadamente 7% da emissão mundial de GEE está relacionada às indústrias de cimento, nas quais, somente durante a reação de descarbonatação do CaCO₃, etapa da produção que requer mais energia segundo Castaldelli (2013), 44% da matéria-prima utilizada é perdida em forma de CO₂. Como resultado, Toledo Filho *et al.* (2002) estimaram uma relação de emissão de CO₂ em 650 kg para cada tonelada de clínquer produzido no Brasil.

Nesse contexto, Isaia (1995) afirma que reduzir o consumo do cimento enriquece a sustentabilidade, já que minimiza os danos ao meio ambiente, promovendo menor consumo de energia e consequente preservação dos recursos naturais necessários para sua produção. Uma das contribuições para essa redução, segundo Davidovits (2008), é a utilização de aglomerantes ativado alcalinamente (AAA), os quais são materiais cimentantes resultantes da ativação alcalina, em que há uma mistura de fontes de aluminossilicatos (precursor sólido) com uma solução fortemente alcalina. Ressalta-se que os primeiros podem ser gerados a partir de resíduos agroindustriais (MORAES *et al.*, 2016; MORAES *et al.*, 2017; FONT *et al.*, 2020), contribuindo, além do contexto ambiental, para a redução do custo de produção.

Entretanto, a indicação do uso de materiais, sistemas ou tecnologias para determinado contexto deve ser sustentada por evidências científicas no ponto de vista ambiental por meio de técnicas de gestão ambiental. Nesse sentido, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se apresenta como uma ótima metodologia, já que permite a análise, quantificação e comparação dos impactos e aspectos ambientais do ciclo de vida, ou seja, de todos os processos de um sistema de produto ou serviços, durante produção, consumo e pós-consumo, racionalizando os dados provenientes dos fluxos de entrada e saída ao longo deles. Ressalta-se que para realizar tal comparação, é necessário que os sistemas tenham funções similares. (ABNT, 2009; PASSUELLO *et al.*, 2014).

O estudo da ACV é constituído por quatro fases, segundo a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), sendo elas: definição de objetivo e escopo, em que são determinadas questões como as fronteiras do sistema, a unidade funcional, o nível de detalhamento e a pretensão de uso do estudo; a análise de inventário do ciclo de vida (ICV), com a coleta de todos os dados necessários para o estudo; a avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV), a qual auxilia a análise, do ponto de vista ambiental, dos resultados obtidos na fase anterior; e a interpretação, com a discussão dos resultados e subsequentes conclusões, limitações, recomendações e decisões finais; conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Relacionamento entre as fases da ACV



Fonte: NBR ISO 14040 (ABNT, 2009)

Em relação à aplicação da ACV em edificações, tem-se que seus estudos podem ser focados, segundo Medeiros, Durante e Callejas (2018), em materiais, componentes, sistemas ou elementos construtivos, de maneira individualizada ou como um todo. Em relação aos primeiros, considerando os materiais alternativos, Balaguera *et al.* (2018) verificaram que há uma redução dos impactos ambientais relacionados ao consumo de energia e ao potencial de aquecimento global, devido, principalmente, à otimização da demanda de recursos naturais e do descarte em aterros sanitários. Além disso, se o uso dos mesmos se der em locais próximos aos de sua geração, há uma redução, também, do consumo de combustíveis fósseis e emissões referentes ao transporte. Porém, deve-se atentar à transformação necessária para que os materiais possam ser utilizados adequadamente como alternativos, já que essa, geralmente, necessita de energia.

Nesse sentido, muitas pesquisas vêm se destinando a estudar e comparar, por meio da ACV, os impactos ambientais de materiais alternativos em relação aos tradicionais (ZHANG *et al.*, 2019; BUTERA, CHRISTENSEN E ASTRUP, 2015; COLANGELO *et al.*, 2017; PASSUELLO *et al.*, 2014; DAHMEN, KIM E OUELLET-PLAMONDON, 2018; KHODABAKHSHIAN *et al.*, 2018). O mesmo ocorre em relação à aplicação dos geopolímeros em substituição ao cimento Portland, porém, em um volume reduzido de publicações, já que se trata de um assunto mais recente.

Segundo Davidovits (1994), a aplicação de geopolímeros na construção civil poderia resultar em uma redução de até 80% das emissões de CO₂ na atmosfera, todavia o mesmo não aplicou a ACV em seus estudos, sendo que, mediante as consultas efetuadas na literatura, o primeiro artigo referente à realização de ACV em geopolímeros data de 2009 (WEIL, DOMBROWSKI, e BUCHWALD, 2009), confirmando a atualidade deste assunto.

Dessa forma, uma das contribuições para o fortalecimento e difusão da ACV se dá pela realização de estudos que visam à integração de informações teóricas, de modo a auxiliar e orientar futuros trabalhos, como o estudo realizado por Ingraio *et al.* (2018), os quais averiguaram informações utilizadas em estudos de ACV, determinando, dentre outros dados, as principais categorias de

impacto consideradas.

2 OBJETIVOS

O presente estudo visa pesquisar em alguns dos principais periódicos científicos internacionais, artigos em que a Avaliação do Ciclo de Vida foi aplicada para analisar os benefícios ambientais da substituição do cimento Portland por AAA e geopolímeros, destacando a evolução cronológica, regiões de aplicação, inventários, métodos, categorias e *softwares* utilizados, além das principais conclusões dos mesmos, de forma a orientar futuros trabalhos na respectiva área.

3 METODOLOGIA

O método de análise aplicado fez-se por meio de uma revisão bibliográfica sistemática em alguns dos principais periódicos científicos internacionais, mediante a plataforma ScienceDirect. Dessa forma, foram empregadas as seguintes palavras-chave: *Life Cycle Assessment*, LCA, *Geopolymers*, *Alkali-activated binders* e *Alkali-activated concrete*.

Isto posto, foram determinadas as seguintes informações:

- Ano em que o estudo foi realizado;
- País de origem;
- Materiais utilizados como fontes de aluminossilicatos;
- Ativadores alcalinos adicionados;
- Bases de dados utilizadas para obtenção do inventário;
- Métodos de AICV aplicados;
- *Softwares* manuseados;
- Principais conclusões.

4 RESULTADOS

Primeiramente, visando verificar as possíveis diferenciações temporais e regionais dos estudos analisados com relação categorias de impactos utilizadas, além das principais conclusões obtidas, foram destacadas as informações dispostas no Quadro 1, referentes a cada artigo.

Quadro 1 – Informações iniciais sobre os artigos revisados

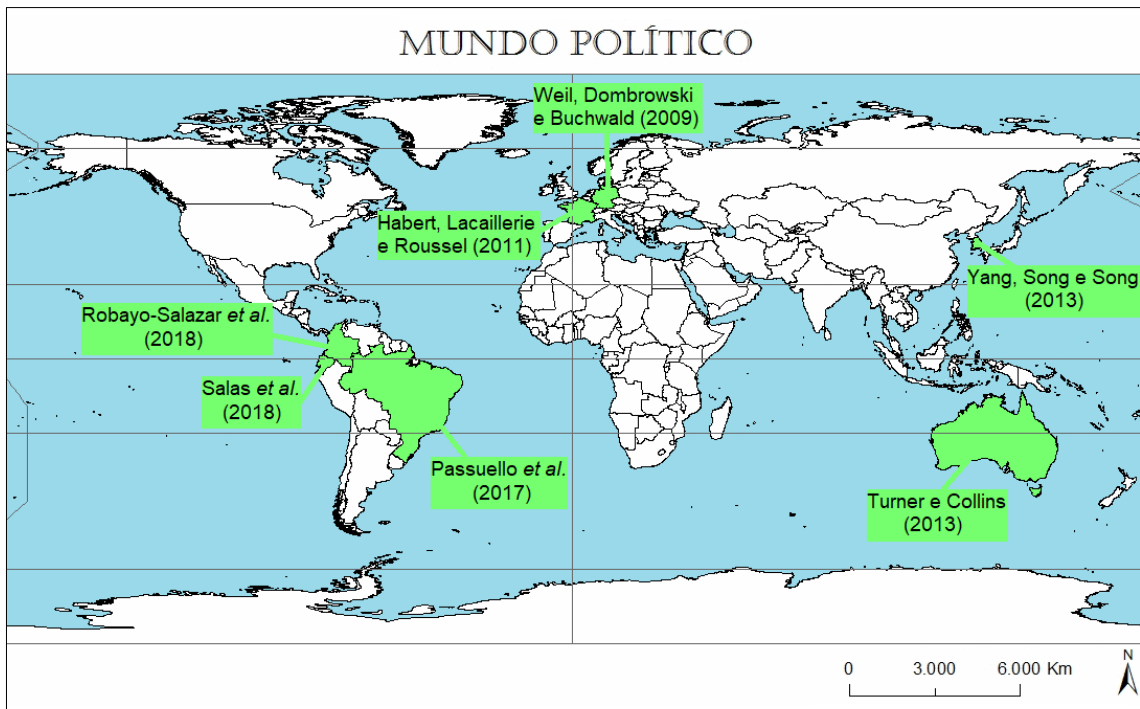
Autores	Título do artigo	Ano do estudo	País de origem	Composição do inventário	Método de AICV	Software
Weil, Dombrowski e Buchwald	Life-cycle analysis of geopolymers	2009	Alemanha	<i>Ecoinvent</i> , literatura e dados primários	CML 2001	-
Habert, Lacaillerie e Roussel	An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends.	2011	França	<i>Ecoinvent</i> , literatura e dados primários	CML 2001	-
Turner e Collins	Carbon dioxide equivalent (CO ₂ -e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete.	2013	Austrália	Dados primários e governo australiano	-	-
Yang, Song e Song	Assessment of CO ₂ reduction of alkali-activated concrete	2013	Coreia do Sul	ICV coreano, banco de dados japonês e literatura	-	-
Passuello <i>et al.</i>	Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators.	2017	Brasil	<i>Ecoinvent</i> 3.1 (adaptado para o Brasil)	CML 2001	<i>OpenLCA</i>

Salas <i>et al.</i>	Life cycle assessment of geopolymers concrete	2018	Equador	Ecoinvent, USLCI, literatura e dados primários	CML 2001	<i>SimaPro</i>
Robayo-Salazar <i>et al.</i>	Life cycle assessment (LCA) of an alkali-activated binary concrete based on natural volcanic pozzolan: A comparative analysis to OPC concrete.	2018	Colômbia	Ecoinvent 3.2	-	<i>OpenLCA</i> 1.6

Fonte: ELABORADO PELO AUTOR, 2019

É importante salientar que as lacunas existentes no Quadro 1 se referem a dados não mencionados nos artigos, estando relacionados aos métodos de AICV e à utilização de *softwares*. Além disso, pode-se perceber que os primeiros estudos referentes à ACV aplicada em geopolímeros se localizam em países europeus, enquanto que os mais recentes estão concentrados na América do Sul, sendo que apenas os mesmos citaram a utilização de *softwares*, como o *SimaPro* e o *OpenLCA*. Dessa forma, visando facilitar a demarcação espacial de cada artigo, foi elaborada a Figura 3, a qual se encontra a seguir.

Figura 3 – Localizações referentes aos artigos analisados



Fonte: ELABORADO PELO AUTOR, 2019

Assim, foi realizada uma análise de cada artigo, considerando os materiais utilizados, tanto as fontes de aluminossilicato como os ativadores alcalinos, as categorias de impacto consideradas e as principais conclusões ao se compararem os materiais alternativos com os tradicionais (cimento ou concreto Portland), conforme encontrado no Quadro 2.

Quadro 2 – Materiais, categorias de impacto e principais conclusões

Referências	Fontes de aluminossilicato	Ativadores alcalinos	Categorias de impacto	Principais conclusões
-------------	----------------------------	----------------------	-----------------------	-----------------------

Weil, Dombrowski e Buchwald (2009)	Mistura de escórias de alto-forno (BSF) com cinza volante (FA) - 80/20	Hidróxido de sódio (NaOH) e Silicato de sódio (Na ₂ SiO ₃)	<ul style="list-style-type: none"> • Depleção abiótica para combustíveis fósseis (ADP); • Potencial de aquecimento global (GWP). 	Em relação ao GWP, os geopolímeros geraram menores impactos. Já em relação à ADP, obtiveram-se valores semelhantes. Além disso, para maiores precisões é importante considerar o transporte e a vida útil dos materiais.
Habert, Lacaillierie e Roussel (2011)	FA, BSF e metacaulim (MK)	NaOH e Na ₂ SiO ₃	<ul style="list-style-type: none"> • Depleção biótica; • Aquecimento global; • Depleção da camada de ozônio; • Ecotoxicidade em água doce e marinha; • Ecotoxicidade terrestre; • Toxicidade humana; • Eutrofização; • Acidificação; • Oxidação fotoquímica. 	Para o aquecimento global, foram gerados menores impactos, mas, em outras categorias, maiores, devido à produção de Na ₂ SiO ₃ . Dessa forma, quanto menor o seu uso, menores serão os impactos. Por esse motivo os impactos referentes às misturas com MK foram superiores aos demais. Ao se considerarem as adições minerais como subprodutos (e não como resíduos) há uma aproximação dos impactos.
Turner e Collins (2013)	FA	NaOH e Na ₂ SiO ₃	<ul style="list-style-type: none"> • GWP. 	Os impactos foram pouco reduzidos, devido à consideração de mineração, tratamento, gasto de energia e transporte de matérias-primas para fabricar os ativadores, além da necessidade de cura por temperatura elevada.
Yang, Song e Song (2013)	FA, MK e escória granulada de alto forno (GGBS)	NaOH, Na ₂ SiO ₃ e hidróxido de cálcio (Ca(OH) ₂)	<ul style="list-style-type: none"> • GWP. 	A redução de emissão de CO ₂ varia dependendo do tipo, concentração e dosagem dos ativadores. Além disso, a intensidade de CO ₂ aumenta proporcionalmente com a intensidade do ligante, entretanto, o concreto com GGBS à base de Ca(OH) ₂ resultou em uma menor intensidade, mesmo com maior consumo de ligante, indicando uma menor inclinação da taxa de aumento.
Passuello <i>et al.</i> (2017)	Lama de caulim calcinada	NaOH, Na ₂ SiO ₃ e solução baseada em cinza de casca de arroz (RHA)	<ul style="list-style-type: none"> • GWP; • Potencial de acidificação; • Potencial de eutrofização; • Ecotoxicidade aquática de água doce e marinha; • Potencial de toxicidade humana; • Oxidação fotoquímica; • Depleção estratosférica de ozônio; • Ecotoxicidade terrestre. 	O uso de Na ₂ SiO ₃ e a cura térmica representam os maiores impactos ambientais em todos os casos, exceto em relação ao GWP. Dessa forma, os ativadores baseados em RHA promoveram os menores impactos.
Salas <i>et al.</i> (2018)	Zeólitos naturais, areia e cascalho	NaOH e Na ₂ SiO ₃	<ul style="list-style-type: none"> • ADP; • GWP; • Potencial de acidificação; • Potencial de eutrofização; • Formação de oxidantes; • Fotoquímicos; • Depleção de ozônio. 	A produção de NaOH é o processo que mais contribui negativamente, dessa forma, se ela se der pela evaporação da água do mar e utilizando energia hidroelétrica, há uma redução de 64% no GWP, porém, um pior desempenho na depleção de ozônio, devido a emissão de clorofluorcarboneto (CFC) durante o processo cloreto-alcalino.
Robayo-Salazar <i>et al.</i> (2018)	Mistura com 70% de pozolana vulcânica natural (NP) e 30% de GGBS	NaOH e Na ₂ SiO ₃	<ul style="list-style-type: none"> • GWP; • Potencial de mudança de temperatura global. 	Houve uma redução no GWP, porém com uma contribuição negativa do transporte das matérias-primas. Os ativadores foram os principais contribuintes em termos de emissão, principalmente o Na ₂ SiO ₃ , sendo sugerido o uso de ativadores alternativos, derivados de métodos

				menos intensivos em energia.
--	--	--	--	------------------------------

Fonte: ELABORADO PELO AUTOR, 2019

Todos os autores consultados mencionaram sobre a influência dos ativadores alcalinos mais aplicados (NaOH e Na₂SiO₃) nos impactos ambientais referentes aos AAA, sugerindo a elaboração de futuras pesquisas voltados à utilização de ativadores alcalinos alternativos, como o estudo de Passuello *et al.* (2017), o qual comprovou a veracidade de sua substituição por uma solução baseada em cinza de casca de arroz. Além disso, o transporte de matérias-primas também foi citado como um notável contribuinte dos impactos, devendo, sempre que possível, ser analisado detalhadamente.

Em relação às categorias de impacto analisadas observou-se que em todos os estudos foi avaliada a GWP, porém, que a mesma considerada sozinha não é suficiente para analisar os impactos ambientais provenientes dos geopolímeros, já que, houve categorias em que os mesmos apresentaram maiores impactos, as quais estão presentes nos estudos que abrangeram mais categorias, sendo que os mesmos utilizaram o CML-2001 como método de AICV, mesmo estando localizados em regiões distintas do globo.

Além disso, pela composição dos inventários pode-se observar que os bancos de dados encontrados em *softwares* como o Ecoinvent não foram suficientes para os estudos, sendo que os autores buscaram e adaptaram as informações por meio de outras fontes, como buscas na literatura, na coleta de dados primários e até por meio de ensaios, visando melhor representar as características da região em que o mesmo foi realizado.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho visou a análise de estudos que verificaram os desempenhos ambientais de aglomerantes alcalinamente ativados (AAA), destacando as principais conclusões e sugestões dos mesmos, expondo que, apesar das diferentes considerações, localizações geográficas e cronologias, os resultados das pesquisas foram semelhantes, principalmente em apontar os ativadores alcalinos como principais contribuintes dos impactos ambientais.

Conclui-se que é necessário que mais pesquisas voltadas a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em AAA sejam realizadas, visto se tratar de um assunto recente e, portanto, com muitas áreas a serem investigadas, principalmente em relação a utilização de ativadores alcalinos alternativos. Além disso, um maior número de estudos também contribuiria para o aperfeiçoamento dos bancos de dados existentes, os quais ainda não se apresentam suficientes para atender às necessidades das pesquisas, sendo necessárias adaptações e buscas em outras fontes.

6 AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer, primeiramente, a Deus, pelo dom da vida. Além disso, à minha família e aos meus amigos, pelo apoio e incentivo de sempre. Ao grupo de Pesquisa em Materiais Alternativos de Construção – MAC, sou grata por toda confiança e oportunidades que foram dadas a mim, principalmente em relação à Camila Cassola Assunção e ao Daniel Oliveira de

Azevedo Sampaio por toda ajuda que me forneceram, e aos professores doutores Jorge Luís Akasaki e Mauro Mitsuuchi Tashima pela orientação e ensinamentos. Por fim, agradeço à instituição FAPESP pelo financiamento da minha pesquisa de iniciação científica.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÏTCIN, Pierre-Claude; MINDESS, Sidney. **Sustainability of Concrete** (Modern Concrete Technology). Spon Press, London. 2011.

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

BALAGUERA, Alejandra *et al.* Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review. **Resources, Conservation and Recycling**, [s.l.], v. 132, p.37-48, maio 2018.

BUTERA, Stefania; CHRISTENSEN, Thomas H.; ASTRUP, Thomas F. Life cycle assessment of construction and demolition waste management. **Waste Management**, [s.l.], v. 44, p.196-205, out. 2015.

CASTALDELLI, Vinícius Nobre. **Estudo de geopolímeros utilizando cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar**. 2013. 87 f. Dissertação (Mestrado) – Área de conhecimento: Estruturas, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

COLANGELO, Francesco *et al.* Life cycle assessment of recycled concretes: A case study in southern Italy. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 615, p.1506-1517, fev. 2018.

DAHMEN, Joseph; KIM, Juchan; OUELLET-PLAMONDON, Claudiane M. Life cycle assessment of emergent masonry blocks. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 171, p.1622-1637, jan. 2018.

DAVIDOVITS, Joseph. **Geopolymer chemistry and applications**. 2ª edition, France, 2008.

DAVIDOVITS, Joseph. **Properties of geopolymer cements**. In: Proceedings of the First International Conference Alkaline Cements and Concretes. Ucrânia. 1994. p.131- 149.

FONT, Alba *et al.* Design and properties of 100% waste-based ternary alkali-activated mortars: Blast furnace slag, olive-stone biomass ash and rice husk ash. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 243, jan. 2020.

HABERT, Guillaume; LACAILLERIE, Jean-Baptiste D'espinoze; ROUSSEL, Nicolas. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 19, n. 11, p.1229-1238, jul. 2011.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores IBGE**. 2019.

INGRAO, Carlo *et al.* How can life cycle thinking support sustainability of buildings? Investigating life cycle assessment applications for energy efficiency and environmental performance. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 201, p.556-569, nov. 2018.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. São Paulo. 1995. 280p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

KHODABAKHSHIAN, Ali *et al.* Mechanical, environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 169, p.237-251, abr. 2018.

MEDEIROS, Larissa Mendes; DURANTE, Luciane Cleonice; CALLEJAS, Ivan Júlio Apolonio. Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, abr./jun. 2018.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo José Melaragno. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MORAES, João Cláudio Bassan *et al.* Effect of sugar cane straw ash (SCSA) as solid precursor and the alkaline activator composition on alkali-activated binders based on blast furnace slag (BFS). **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 144, p.214-224, jul. 2017.

MORAES, João Cláudio Bassan *et al.* Increasing the sustainability of alkali-activated binders: The use of sugar cane straw ash (SCSA). **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 124, p.148-154, out. 2016.

NAÇÕES UNIDAS (1987), **Relatório da Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento**, 42/187.

OCHOA, Luis; HENDRICKSON, Chris; MATTHEWS, H. Scott. Economic Input-output Life-cycle Assessment of U.S. Residential Buildings. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 8, n. 4, p.132-138, dez. 2002.

PASSUELLO, Ana Carolina Badalotti *et al.* Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 7-20, out/dez. 2014.

PASSUELLO, Ana Carolina Badalotti *et al.* Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 166, p.680-689, nov. 2017.

ROBAYO-SALAZAR, Rafael *et al.* Life cycle assessment (LCA) of an alkali-activated binary concrete based on natural volcanic pozzolan: A comparative analysis to OPC concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 176, p.103-111, jul. 2018.

SALAS, Daniel Andrés. *et al.* Life cycle assessment of geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 190, p.170-177, nov. 2018.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO - SNIC. **Disponível em:** <<http://www.snic.org.br/>>. Acesso em: Jul/2019.

TOLEDO FILHO *et al.*, **Desenvolvimento de concretos de baixo impacto ambiental utilizando materiais cimentícios de baixo consumo de energia e emissão de CO₂**. In: IX Congresso Brasileiro de Energia/IV Seminário Latino Americano de Energia. Rio de Janeiro/RJ, 2002, p. 174-180.

TURNER, Louise K.; COLLINS, Frank G. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 43, p.125-130, jun. 2013.

WEIL, Marcel; DOMBROWSKI, Kirk; BUCHWALD, Anja. Life-cycle analysis of geopolymers. In: PROVIS, John L.; VAN DEVENTER, Jannie S.j. (Ed.). **Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications**. Germany: Woodhead Publishing, 2009. p. 194-210.

YANG, Keun-hyeok; SONG, Jin-kyu; SONG, Keum-il. Assessment of CO₂ reduction of alkali-activated concrete. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 39, p.265-272, jan. 2013.

ZHANG, Yurong *et al.* A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 209, p.115-125, jun. 2019.