



AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE CONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS: ESTUDO COMPARATIVO

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF GEOPOLYMER CONCRETE: A COMPARATIVE STUDY

EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE LOS HORMIGONES GEOPOLIMÉRICOS: ESTUDIO COMPARATIVO

Rafael Saaid Meyrelles ^{1*}, João Luiz Calmon ², Lukas Damazio Bello ³, & Taísa Menezes Medina ⁴

^{1 2 3 4} Universidade Federal do Espírito Santo

¹ meyrellesrafael@gmail.com ² calmonbarcelona@gmail.com ³ lukasdbello@gmail.com ⁴ taisamedin@gmail.com

ARTIGO INFO.

Recebido: 17.06.2024

Aprovado: 27.06.2024

Disponibilizado: 12.09.2024

PALAVRAS-CHAVE: Avaliação do Ciclo de Vida; Concretos geopoliméricos; sustentabilidade; Aquecimento global.

KEYWORDS: Life Cycle Assessment; Geopolymer Concrete; sustainability; global warming.

PALABRAS CLAVE: Evaluación del ciclo de vida; Hormigones geopoliméricos; sostenibilidad; calentamiento global.

*Autor Correspondente: Meyrelles, R. S.

RESUMO

A indústria da construção civil é responsável por uma parcela considerável da emissão de dióxido de carbono na atmosfera. A produção do concreto, que é o segundo material mais utilizado no mundo, é responsável pela maior parte das emissões de gases de efeito estufa das construções. Levando isso em consideração, essa pesquisa tem como objetivo apresentar soluções para a redução da pegada de carbono da indústria da construção civil. Para que seja possível obter um diagnóstico quantificando os impactos ambientais, é necessário que se utilize a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), que é uma metodologia holística que estuda os aspectos ambientais e os impactos potenciais, diretos e indiretos, ao longo da vida de um produto. A opção para redução de impactos avaliada foi a substituição do Concreto Convencional (CC) pelo Concreto Geopolimérico (CG), que é feito a partir da substituição total do ligante, cimento, por materiais pulverulentos ricos em sílica e alumina. Foram avaliados cinco cenários diferentes, uma cidade em cada região do Brasil. O resultado da ACV mostrou que os CG tem grande potencial de redução da pegada de carbono, gerando uma redução de até 60% no potencial de aquecimento global.

ABSTRACT

The construction industry is responsible for a considerable proportion of carbon dioxide emissions into the atmosphere. The production of concrete, which is the second most used material in the world, is responsible for most of the greenhouse gas emissions from buildings. This research aims to present solutions for reducing the carbon footprint of the construction industry. To obtain a diagnosis quantifying environmental impacts, it is necessary to use Life Cycle Assessment (LCA), which is a holistic methodology for environmental aspects and potential impacts, both direct and indirect, throughout life cycle of a product. The option to reduce the greenhouse gas emissions was the replacement of Conventional Concrete (CC) for Geopolymer Concrete (GC), which is made by completely replacing the binder, cement, with powdery materials rich in silica and alumina. Five different scenarios were evaluated, one city in each region of Brazil. The results of the LCA showed that GCs have great potential for reducing the carbon footprint, reducing up to 60% of global warming potential.

RESUMEN

La industria de la construcción es responsable de una parte considerable de la emisión de dióxido de carbono en la atmósfera. La producción de concreto, que es el segundo material más utilizado en el mundo, es responsable de la mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero de las construcciones. Esta investigación tiene como objetivo presentar soluciones para la reducción de la huella de carbono de la industria de la construcción. Para poder obtener un diagnóstico cuantificando los impactos ambientales, es necesario utilizar la Evaluación del Ciclo de Vida (ACV), que es una metodología holística que estudia los aspectos ambientales y los impactos potenciales, directos e indirectos, a la vida de un producto. La opción para la reducción de impactos evaluada fue la sustitución del Concreto Convencional (CC) por el Concreto Geopolimérico (CG), que se hace a partir de la sustitución total del ligante, cemento, por materiales pulverulentos ricos en sílice y alúmina. Se evaluaron cinco escenarios diferentes, una ciudad en cada región de Brasil. El resultado de la ACV mostró que los CG tienen un gran potencial de reducción de la huella de carbono, generando una reducción de hasta el 60% en potencial de calentamiento global.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente foram observados diversos eventos catastróficos relacionados às mudanças climáticas geradas por ações antrópicas, como enchentes, tempestades, incêndios, ondas de calor, nevascas entre outros. As mudanças climáticas são acentuadas pela emissão de gases com capacidade de agravar o efeito estufa, tais como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso (IPAM, 2015).

Esse tema está em pauta em diversos governos no mundo, com a maioria deles se comprometendo a cumprir metas estipuladas para a desaceleração do processo de aquecimento global através da redução das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera. Um exemplo desses eventos foi a 28ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP-28), sediada em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, no ano de 2023. A otimização de processos produtivos e redução de suas emissões, visando reduzir a pegada de carbono, é de suma importância para que as metas dos acordos sejam alcançadas dentro do prazo estipulado. O cumprimento dos acordos é de grande importância para um planeta livre de emissões excessivas de gases do efeito estufa e para a redução da poluição da água (Zanellato, 2016).

Pesquisas recorrentes indicam que a indústria da construção civil é responsável por uma parcela considerável da emissão de dióxido de carbono na atmosfera, além de suas atividades serem responsáveis por uma parcela considerável do esgotamento das reservas naturais em escala mundial. A extração de matérias-primas fornecidas para a indústria da construção civil gera outros impactos ambientais, tais como mudança de paisagem, danos à saúde humana, contaminação do solo e degradação de ecossistemas. Somente a produção de concreto, que é o segundo material mais utilizado no mundo é responsável por um valor entre 6% e 9% de emissões globais e seu consumo aumenta a uma taxa de 9% ao ano, devido à alta demanda de ocupação urbana (Castel et al., 2016).

O cimento é o principal material componente do concreto e é o grande responsável pelos impactos ambientais dele. Por conta do cimento, o processo de produção do concreto convencional pode gerar valores entre 0,85 e 0,92 toneladas de CO²-eq por m³ produzido (Prakasan et al., 2020). Se a indústria de construção civil fosse um país, ela ocuparia a terceira posição entre os maiores emissores de gás carbônico no mundo (Timperley et al., 2019).

O cimento é o material que liga os agregados entre si, formando um todo compacto. Apesar de ser versátil e possuir matérias-primas em diversos lugares, possibilitando produção local em quase todos os países, o cimento possui um grande impacto ambiental devido a um de seus componentes, o clínquer. “Esse material possui o processo de calcinação a 1.500° C em sua produção e essa etapa possui um consumo alto de energia (1.110 kwh/t de cimento)” (Mehta & Monteiro, 2008, p. 660), e com isso se torna responsável por uma quantidade significativa de emissões atmosféricas, alcançando um valor próximo de 0,9t de CO² por tonelada de clínquer produzido (Celik et al., 2015). Por conta dos números citados anteriormente, o cimento torna-se um material-chave para a redução da pegada de carbono da produção do concreto, conseqüentemente, da indústria da construção civil, tendo em vista

que a produção dele é responsável por cerca de 75% do impacto relativo a mudanças climáticas do concreto convencional de cimento Portland (Silva et al., 2020).

Entretanto, vale ressaltar que o setor da construção civil é muito influente na área econômica, gerando emprego e renda para diversos trabalhadores de diferentes níveis de qualificação. Apesar disso, os modelos construtivos atuais precisam passar por modernizações para que se tornem mais sustentáveis (Zanellato, 2016). O desenvolvimento sustentável é propõe uma harmonização entre o crescimento econômico, inclusão social e a proteção ambiental, com a finalidade de garantir as necessidades da sociedade sem que ocorra o comprometimento dos recursos naturais para as futuras gerações (Feil & Schreiber, 2017).

Avaliando toda a problemática em torno da produção do Concreto de Cimento Portland (CC), é necessário buscar alternativas a esse produto. Uma opção para a redução da pegada de carbono da indústria da construção civil é a substituição do concreto convencional pelos Concretos Geopoliméricos (CG), que são feitos a partir da substituição total do ligante, cimento, por materiais pulverulentos ricos em sílica e alumina. Para obter as propriedades do concreto se faz necessário ativar as reações químicas através de um material ativador, que é uma solução alcalina aquosa constituída de hidróxidos e silicatos alcalinos (Longhi, 2015). Por conta da substituição do cimento, os Concretos Geopoliméricos possuem resultados ambientais melhores que os convencionais, quando avaliada a emissão de gases do efeito estufa (Habert; Lacaille; Roussel, 2011). Os materiais precursores mais utilizados para a produção do CG são o metacaulim, produzido pela calcinação de argilas caulínicas, a cinza volante, que são as cinzas de textura mais finas arrastadas pelos gases de combustão das fornalhas da caldeira de termoelétricas e abatidas por precipitadores eletrostáticos e a escória de alto forno, que é um coproduto do processo de produção de aço. Apesar dos Concretos Geopoliméricos serem feitos sem o cimento, componente de maior contribuição para mudanças climáticas dos concretos convencionais, seu processo de produção não é limpo, e isso se deve ao consumo de recursos não renováveis, transporte e produção de produtos químicos para sua produção (Passuello et al., 2017).

Uma forma de obter um diagnóstico detalhado e quantificado dos impactos ambientais dos processos de produção do CC e CG é por meio da utilização da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), que é uma metodologia holística que estuda os aspectos ambientais e os impactos potenciais, diretos e indiretos, ao longo da vida de um produto, desde a extração da matéria-prima, transporte, produção, uso, pós-uso e disposição (NBR ISO 14040, 2009). A ACV está sendo cada vez mais utilizada em comparações entre tecnologias consolidadas e novas tecnologias que têm o intuito de reduzir a emissão de gases do efeito estufa, consumo de recursos não renováveis, poluição de águas, entre outros. A ACV voltada para o CG pode auxiliar as empresas a realizar projetos ambientalmente sustentáveis, assim como apontar quais etapas do processo de produção produzem o maior impacto, possibilitando uma ênfase na área com maior demanda de estudos, visando a otimização dessa área.

Uma vez que a produção do concreto é responsável pela maior parte do impacto ambiental da indústria da construção civil, essa pesquisa consiste em realizar uma Avaliação de Ciclo de

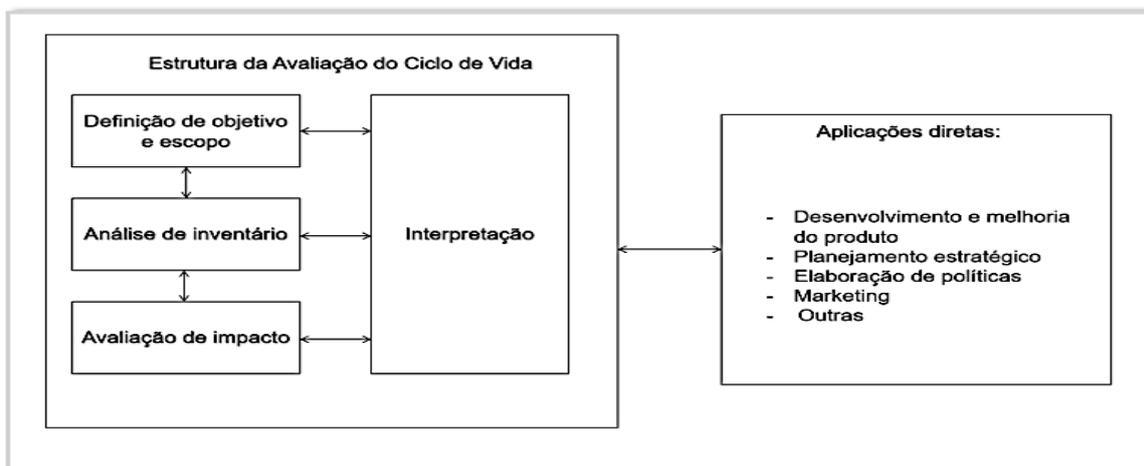
Vida comparativa entre Concretos Convencionais e Concretos Geopoliméricos, com sua produção em cinco usinas de concreto, localizadas nas cidades de Serra (ES), Porto Alegre (RS), Brasília (DF), Recife (PE) e Belém (PA). Essas cidades foram escolhidas para haver uma representação de todas as regiões brasileiras: sul, sudeste, nordeste, centro-oeste e norte. As cidades escolhidas são as maiores de cada estado e possuem um grande número de concreteiras. Ressalta-se que a fim de obter resultados comparáveis, a produção dos traços de concreto compartilha as mesmas matérias-primas.

2 METODOLOGIA

O estudo utilizou a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que é definida pelas normas NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044. A metodologia ACV consiste nas seguintes etapas:

- a) definição de objetivo e escopo;
- b) análise de inventário de ciclo de vida;
- c) avaliação de impacto de ciclo de vida;
- d) interpretação.

Figura 1. Estrutura da Avaliação do Ciclo de Vida



Fonte: Adaptado de NBR ISO 14040 (2009).

2.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO

O objetivo desta pesquisa é realizar uma Avaliação do Ciclo de Vida comparativa de 5 traços diferentes de concretos: 3 concretos geopoliméricos e 2 concretos convencionais, produzidos em usinas concreteiras hipotéticas na Serra (ES), Porto Alegre (RS), Brasília (DF), Recife (PE) e Belém (PA). O público-alvo dessa ACV é a comunidade técnica e científica que atua na linha de pesquisa sobre construção sustentável, utilização de coprodutos industriais e o meio empresarial ligado a produção de concreto e construção civil.

O estudo vai adotar 1 m³ de cada traço de concreto como unidade funcional, todas as entradas do sistema serão expressas em relação a esse valor. Dessa forma, quando inseridas as entradas no inventário como: kg de areia, kg de brita, kg de ativador, kg de água, kg de cimento, entre outros, são valores relacionados à produção de 1 m³ de concreto. Vale ressaltar que foram selecionados concretos com resistência a compressão similares. Essa padronização se faz necessária para garantir a comparação dos dados de todos os traços analisados na pesquisa.

A fronteira do sistema estudada é denominada do berço ao portão (*cradle-to-gate*), ou seja, considera-se as seguintes etapas do ciclo de vida: extração da matéria-prima, beneficiamento da matéria-prima e fabricação dos concretos. Vale ressaltar que os transportes de todas as etapas são considerados até a usina concreteira.

2.2 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

A análise do inventário de ciclo de vida compila e quantifica os fluxos de entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*). Neste item as informações do *software*, dados de entrada dos sistemas e base de dados utilizados serão apresentados.

O banco de dados utilizado para essa pesquisa é o Ecoinvent 3.6, disponibilizado pelo grupo de pesquisa Grupo de Avaliação do Ciclo de Vida em Sistemas de Produção no Ambiente Construído (ACVamb), com cadastro no CNPq. Esse banco de dados possui mais de 20 mil conjuntos de dados relacionados aos processos produtivos de diversos produtos, além de uma elevada transparência (ACV BRASIL, 2020). A pesquisa também irá utilizar a literatura como referência para os traços dos concretos que serão avaliados.

O *software* escolhido para a execução da pesquisa é o OpenLCA 2.0, por ser de acesso livre, possuir boas capacidades de exportar e importar arquivos e amplamente utilizado em estudos de ACV.

2.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA

A avaliação de impacto dessa ACV foi realizada através de duas metodologias: ReCiPe e IMPACT 2002+, que são metodologias com abordagem combinada que abrangem as categorias de impacto (*midpoints*) e categorias de dano (*endpoints*) (Jolliet et al., 2003). A avaliação dos *endpoints*, gerada através do ReCiPe, é realizada através da soma dos *midpoints* que possuem a mesma unidade de medida, que são transformadas em três grandes categorias. Essas três categorias são: impacto na saúde humana (*human health*) que possui a unidade de medida DALY, que representa o número de anos perdidos por conta de doenças; impacto no ecossistema (*ecosystems*) que possui a unidade de medida *species.yr*, que representa o impacto sobre as espécies ao longo do tempo; e uso de recursos (*resources*) que possui a unidade de medida USD2013, que representa o valor monetário para quantificar os impactos econômicos.

A análise do potencial de aquecimento global (*global warming*) foi realizada através do IMPACT 2002+. Essa metodologia gera um resultado agrupado de aquecimento global, diferente do ReCiPe, além de ser amplamente utilizada por pesquisadores de ACV.

2.4 TRAÇOS DE CONCRETOS UTILIZADOS NOS CENÁRIOS AVALIADOS

A Tabela 1a seguir enumera os quantitativos de materiais utilizados nos traços dos concretos avaliados nessa pesquisa. Vale ressaltar que a escolha dos materiais se deu por conta da alta utilização em pesquisas globais, o que facilita a comparação entre diferentes autores e torna viável debates que utilizam diversos trabalhos como fonte.

Tabela 1. Traços utilizados na pesquisa

| Tipo de concreto | Cimento (Kg/m ³) | Material precursor (Kg/m ³) | NaOH (Kg/m ³) | NaSiO (Kg/m ³) | Agregado miúdo (Kg/m ³) | Agregado graúdo (Kg/m ³) | Água (Kg/m ³) | Resistência compressão (MPa) |
|------------------|------------------------------|---|---------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| CG-FA (a) | 0 | 425 | 25 | 70 | 686 | 1028 | 116 | 52 |
| CG-MK (a) | 0 | 350 | 9 | 113 | 611 | 917 | 186 | 58 |
| CG-GGBFS (c) | 0 | 347 | 0 | 78 | 801 | 1090 | 174 | 50 |
| CC-CPIII (d) | 420 | 0 | 0 | 0 | 588 | 882 | 168 | 52 |
| CC-CPI (b) | 384 | 0 | 0 | 0 | 758 | 1015 | 201 | 51 |

a) Shi, Qu, Provis, 2019; b) Marinkovic et al., 2017; c) Collins & Sanjayan, 1999; d) Medeiros-Junior et al., 2014.

2.5 DISTÂNCIAS DOS CENÁRIOS AVALIADOS

As tabelas a seguir detalham as distâncias de cada matéria-prima até a usina de produção do concreto. É importante salientar que os locais são reais, não fictícios. Por conta disso algumas distâncias são bem maiores que outras, impactando no resultado final.

Tabela 2: Distâncias das matérias-primas até a usina de Serra/ES

| Material | Localização | Distância |
|--------------------------------|---------------------|-----------|
| Água | Rede municipal | - |
| Cimento Portland (CPIII e CPI) | Vitória – ES | 10 km |
| Escória de alto forno | Vitória – ES | 10 km |
| Agregado graúdo | Serra – ES | 20 km |
| Agregado miúdo | Serra – ES | 20 km |
| Metacaulim | Prado – BA | 426 km |
| Hidróxido de sódio | Cubatão – SP | 1023 km |
| Silicato de Sódio | Rio de Janeiro – RJ | 596 km |
| Cinza Volante | Candiota – RS | 2490 km |

Fonte: Autores.

Tabela 3: Distâncias das matérias-primas até a usina de Porto Alegre/RS

| Material | Localização | Distância |
|--------------------------------|---------------------|-----------|
| Água | Rede municipal | - |
| Cimento Portland (CPIII e CPI) | Porto Alegre – RS | 8 km |
| Escória de alto forno | Glorinha – RS | 42 km |
| Agregado graúdo | Montenegro – RS | 48 km |
| Agregado miúdo | Porto Alegre – RS | 30 km |
| Metacaulim | Pântano Grande – RS | 126 km |
| Hidróxido de sódio | Porto Alegre – RS | 2 km |
| Silicato de Sódio | Içara – SC | 277 km |
| Cinza Volante | Candiota – RS | 400 km |

Fonte: Autores.

Tabela 4: Distâncias das matérias-primas até a usina de Brasília/DF

| Material | Localização | Distância |
|--------------------------------|--------------------------|-----------|
| Água | Rede municipal | - |
| Cimento Portland (CPIII e CPI) | Brasília – DF | 31 km |
| Escória de alto forno | Monlevade – MG | 844 km |
| Agregado graúdo | Planaltina – GO | 64 km |
| Agregado miúdo | Brasília – DF | 41 km |
| Metacaulim | Lassance – MG | 627 km |
| Hidróxido de sódio | Rio Grande da Serra – SP | 1081 km |
| Silicato de Sódio | Rio Grande da Serra – SP | 1081 km |
| Cinza Volante | Candiota – RS | 2580 km |

Fonte: Autores.

Tabela 5: Distâncias das matérias-primas até a usina de Recife/PE

| Material | Localização | Distância |
|--------------------------------|------------------------------|-----------|
| Água | Rede municipal | - |
| Cimento Portland (CPIII e CPI) | Paulista – PE | 34 km |
| Escória de alto forno | Recife – PE | 13 km |
| Agregado graúdo | Pedras de Fogo – PE | 108 km |
| Agregado miúdo | Recife – PE | 15 km |
| Metacaulim | Cabo do Santo Agostinho – PE | 39 km |
| Hidróxido de sódio | Recife – PE | 11 km |
| Silicato de Sódio | Recife – PE | 11 km |
| Cinza Volante | São Gonçalo do Amarante – CE | 839 km |

Fonte: Autores.

Tabela 6: Distâncias das matérias-primas até a usina de Belém/PA

| Material | Localização | Distância |
|--------------------------------|------------------------------|-----------|
| Água | Rede municipal | - |
| Cimento Portland (CPIII e CPI) | Ananindeua – PA | 27 km |
| Escória de alto forno | Marabá – PA | 565 km |
| Agregado graúdo | Parauapebas – PA | 713 km |
| Agregado miúdo | Belém – PA | 13 km |
| Metacaulim | Ipixuna – PA | 252 km |
| Hidróxido de sódio | Jaboatão dos Guararapes – PE | 2038 km |
| Silicato de Sódio | Jaboatão dos Guararapes – PE | 2038 km |
| Cinza Volante | São Luís – MA | 571 km |

Fonte: Autores.

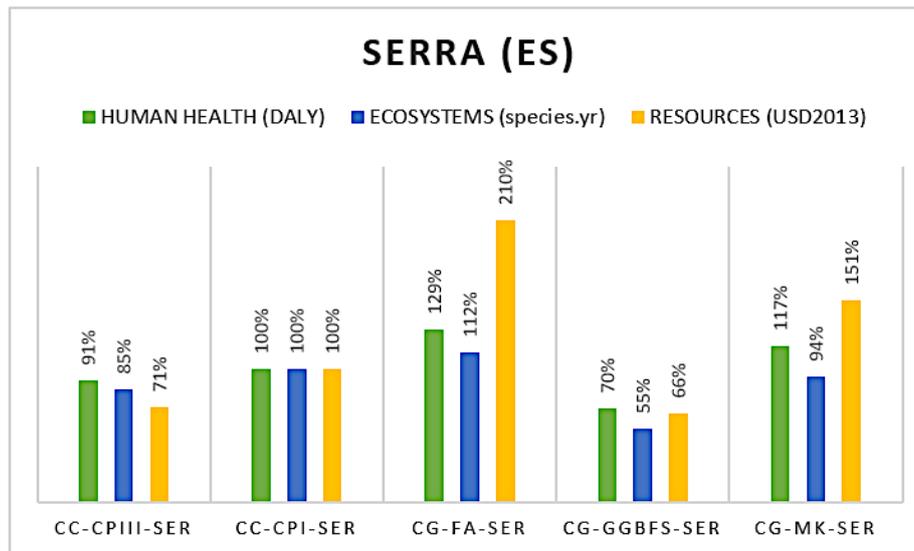
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 RESULTADOS PARA SERRA

Para a cidade de Serra, Espírito Santo, o produto com melhor desempenho ambiental foi o concreto geopolimérico a base de escória granulada de alto forno (CG-GGBFS-SER), e isso se deve ao fato desse material ser um coproduto industrial e sua disponibilidade está a apenas 10 km da usina proposta para esse cenário. Conforme analisado na revisão bibliográfica e nos resultados obtidos com o OpenLCA, a distância da matéria-prima impacta diretamente o resultado final da ACV.

O CG-GGBFS-SER poderia ter um impacto ambiental ainda menor caso os ativadores fossem produzidos no próprio estado (Espírito Santo), e não em São Paulo (1.023 km) e Rio de Janeiro (596 km). Mesmo com essas distâncias o concreto geopolimérico gerou um dano ambiental menor que o concreto convencional a base de cimento CPIII (CC-CPIII-SER), que é amplamente conhecido, e muito utilizado na região, pela sua redução de custos e impacto ambiental em relação ao concreto convencional a base de cimento CPI (CC-CPI-SER).

Figura 2. Resultados para Serra/ES



Fonte: Autores. Nota: CC-CPIII-SER: Concreto Convencional CPIII na Serra; CC-CPI-SER: Concreto Convencional CPI na Serra; CG-FA-SER: Concreto Geopolimérico de Cinza Volante na Serra; CG-GGBFS-SER: Concreto Geopolimérico de Escória Granulada de Alto Forno na Serra; CG-MK-SER: Concreto Geopolimérico de Metacaulim na Serra.

Os demais concretos geopoliméricos não obtiveram resultados positivos nesse comparativo. No caso do concreto a base de cinza volante (CG-FA-SER) isso se deve à distância do material precursor até a usina, 2.490 km. Da mesma forma, o material precursor do geopolimérico de metacaulim (CG-MK-SER) está a 426 km, interferindo bastante no resultado final.

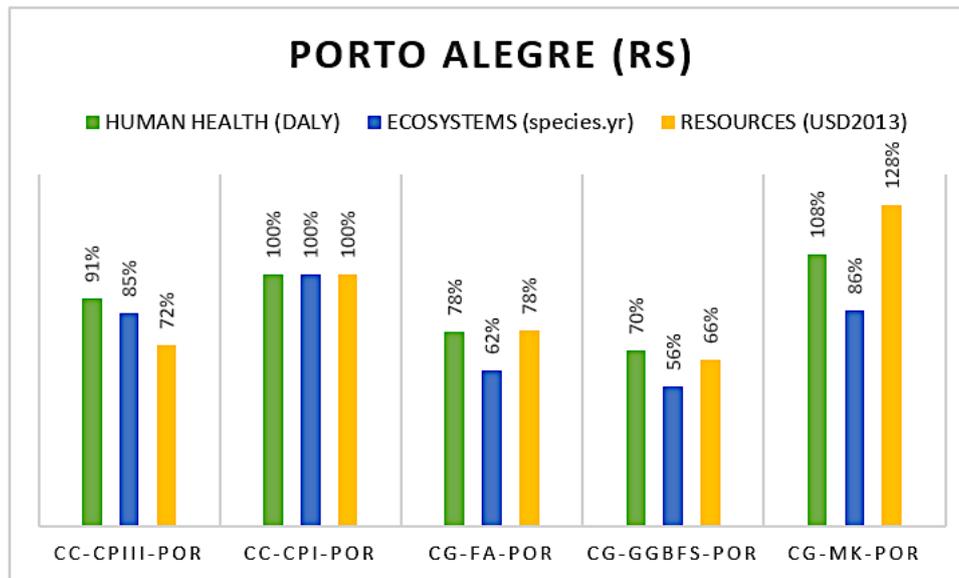
O CG-GGBFS-SER demonstrou um desempenho ambientalmente superior em quase todas as categorias e isso se dá por conta da distância da Escória até a Usina que é baixa, facilitando e reduzindo as emissões resultantes do transporte. Uma forma de melhorar ainda mais o desempenho para a Serra, como dito anteriormente, seria através da disponibilidade dos ativadores na cidade, porque no cenário avaliado os produtos químicos vem de São Paulo e Rio de Janeiro. Portanto, conclui-se que, na cidade de Serra, Espírito Santo, o CG-GGBFS-SER já possui viabilidade ambiental, podendo ser majorada caso haja uma produção local dos ativadores.

3.2 RESULTADOS PARA PORTO ALEGRE

Para a cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, o produto com melhor desempenho ambiental foi o concreto geopolimérico a base de escória granulada de alto forno (CG-GGBFS-POR), mas nesse cenário é importante destacar que o concreto geopolimérico a base de cinza volante (CG-FA-POR) também apresentou uma grande redução de impactos ambientais.

No cenário avaliado, o material precursor do CG-GGBFS-POR está a 42 km da usina, o que contribuiu para a grande redução nos impactos que esse produto obteve em relação ao concreto convencional a base de CPI (CC-CPI-POR). O CG-FA-POR, apesar de ter seu material precursor a 400 km da usina, se mostrou ambientalmente viável. Os ativadores, em contraponto ao cenário anterior, possuem uma distância de deslocamento muito menor, sendo 2 km para o hidróxido de sódio e 277 km para o silicato de sódio. Essas distâncias influenciam muito no resultado comparativo final.

Figura 3. Resultados para Porto Alegre/RS



Fonte: Autores. Nota: CC-CPIII-POR: Concreto Convencional CPIII em Porto Alegre; CC-CPI-POR: Concreto Convencional CPI em Porto Alegre; CG-FA-POR: Concreto Geopolimérico de Cinza Volante em Porto Alegre; CG-GGBFS-POR: Concreto Geopolimérico de Escória Granulada de Alto Forno em Porto Alegre; CG-MK-POR: Concreto Geopolimérico de Metacaulim em Porto Alegre.

Nesse cenário, apenas o concreto geopolimérico a base de metacaulim não apresentou resultados favoráveis, apesar de ter obtido uma redução na categoria *ecosystems*. Essa cidade possui uma vasta quantidade de indústrias e isso contribuiu para que houvesse a redução das distâncias de deslocamentos das matérias-primas e, conseqüentemente, os concretos geopoliméricos obtiveram um desempenho ambiental superior aos concretos convencionais, tendo os resultados inclusive melhores que na avaliação do cenário anterior, para a cidade de Serra. Portanto, conclui-se que o CG-GGBFS-POR e CG-FA-POR possuem viabilidade ambiental para sua produção em Porto Alegre.

Conforme analisado no cenário para a cidade de Serra, em Porto Alegre os concretos com materiais precursores mais próximos obtiveram um desempenho ambiental favorável. Nesse cenário, o material precursor do CG-FA-POR e CG-GGBFS-POR estão a 400 km e 42 km, respectivamente, que são distâncias menores que nas outras simulações.

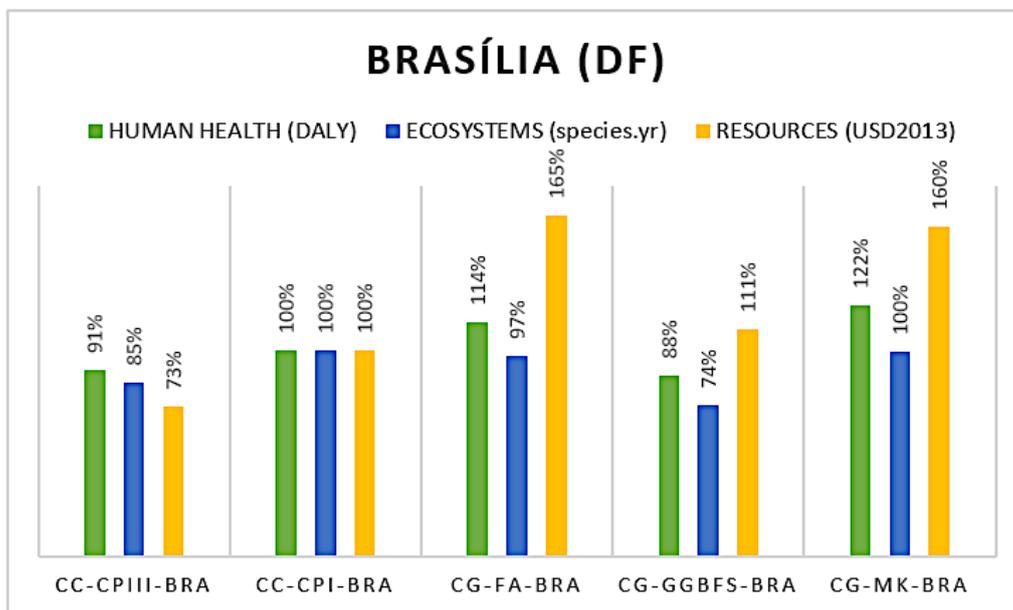
No comparativo global Porto Alegre obteve os melhores desempenhos com os concretos geopoliméricos, e isso reforça a alternativa citada no capítulo anterior, visando a redução do impacto ambiental, através do aumento da disponibilidade dos materiais precursores em regiões mais próximas.

3.3 RESULTADOS PARA BRASÍLIA

Em Brasília, Distrito Federal, o produto com melhor desempenho ambiental foi o concreto geopolimérico a base de escória granulada de alto forno (CG-GGBFS-BRA), porém na categoria *resources* ele possui um desempenho inferior aos concretos convencionais, por conta da distância da matéria-prima até a usina (844 km).

Apesar de ser a capital do Brasil, Brasília é uma cidade fora do eixo industrial, o que aumenta o impacto ambiental e onera a produção do concreto geopolimérico. Os ativadores percorrem uma distância de 1.081 km, mas ainda assim o CG-GGBFS-BRA conseguiu obter um resultado positivo em relação ao concreto convencional a base de cimento CPI (CC-CPI-BRA).

Figura 4. Resultados para Brasília/DF



Fonte: Autores. Nota: CC-CPIII-BRA: Concreto Convencional CPIII em Brasília; CC-CPI-BRA: Concreto Convencional CPI em Brasília; CG-FA-BRA: Concreto Geopolimérico de Cinza Volante em Brasília; CG-GGBFS-BRA: Concreto Geopolimérico de Escória Granulada de Alto Forno em Brasília; CG-MK-BRA: Concreto Geopolimérico de Metacaulim em Brasília.

Esse cenário possui uma situação semelhante ao cenário da Serra. Existe a viabilidade ambiental, ainda que seja menor, porém ela pode ser majorada caso a produção dos materiais precursores ocorra em um local mais próximo da usina de produção de concreto. Mas, devido à distância da escória, o concreto convencional a base de cimento CPIII (CC-CPIII-BRA) passa a ser uma opção mais segura em relação aos outros.

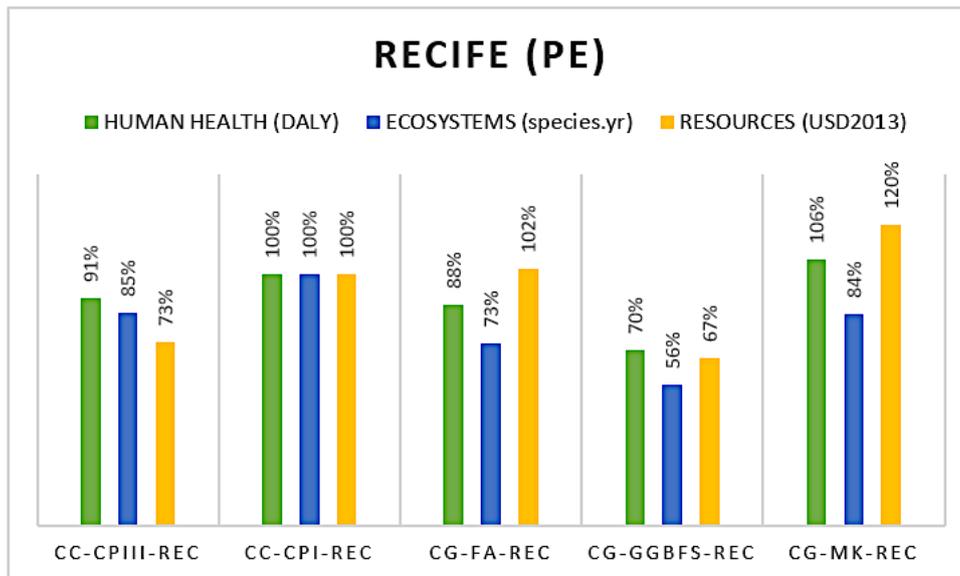
A distância dos materiais precursores, assim como nos outros cenários, gera um impacto grande no resultado final, e é possível observar isso com o resultado apresentado nesse tópico, levando em consideração que a distância da Escória de Alto Forno até a usina é de 844 km, da Cinza Volante é 1803 km e do Metacaulim é 627 km. Entretanto, apesar dessas distâncias e dos ativadores dos concretos geopoliméricos percorrerem 1081 km até a usina desse cenário, é possível observar uma viabilidade ambiental desse concreto, principalmente em relação ao potencial de aquecimento global, o que demonstra o potencial desse produto caso haja investimento na infraestrutura para a produção dele.

Portanto conclui-se que, devido às grandes distâncias que o material precursor dos concretos geopoliméricos tem que percorrer, 844 km para a escória, 627 km para o metacaulim, 1803 km para a cinza volante, em Brasília o concreto com a maior viabilidade é o CC-CPIII-BRA.

3.4 RESULTADOS PARA RECIFE

Para a cidade de Recife, Pernambuco, o produto com melhor desempenho ambiental é o concreto geopolimérico a base de escória granulada de alto forno (CG-GGBFS-REC), demonstrando obter os melhores indicadores em todas as categorias de impacto *endpoints* avaliadas. Nesse cenário, e em todos os outros, o concreto convencional de CIII (CC-CPIII-REC) também demonstrou uma redução de impactos quando comparado ao CPI (CC-CPI-REC), mas, ainda assim, obtendo indicadores piores que os concretos geopoliméricos de cinza volante (CG-FA-REC) e escória granulada de alto forno (CG-GGBFS-REC).

Figura 5. Resultados para Recife/PE



Fonte: Autores. Nota: CC-CPIII-REC: Concreto Convencional CIII em Recife; CC-CPI-REC: Concreto Convencional CPI em Recife; CG-FA-REC: Concreto Geopolimérico de Cinza Volante em Recife; CG-GGBFS-REC: Concreto Geopolimérico de Escória Granulada de Alto Forno em Recife; CG-MK-REC: Concreto Geopolimérico de Metacaulim em Recife.

A produção do CG-FA-REC gerou uma redução de danos nas categorias de impacto *human health* e *ecosystems*, tendo um resultado 2% acima em *resources*. Vale ressaltar que nesse cenário todos os concretos geopoliméricos demonstraram vantagem em alguma categoria. O CG-GGBFS-REC obteve redução em todas as categorias de impacto, o CG-FA-REC nas duas categorias citadas nesse parágrafo e o concreto geopolimérico a base de metacaulim (CG-MK-REC) gerou redução de danos em *ecosystems*.

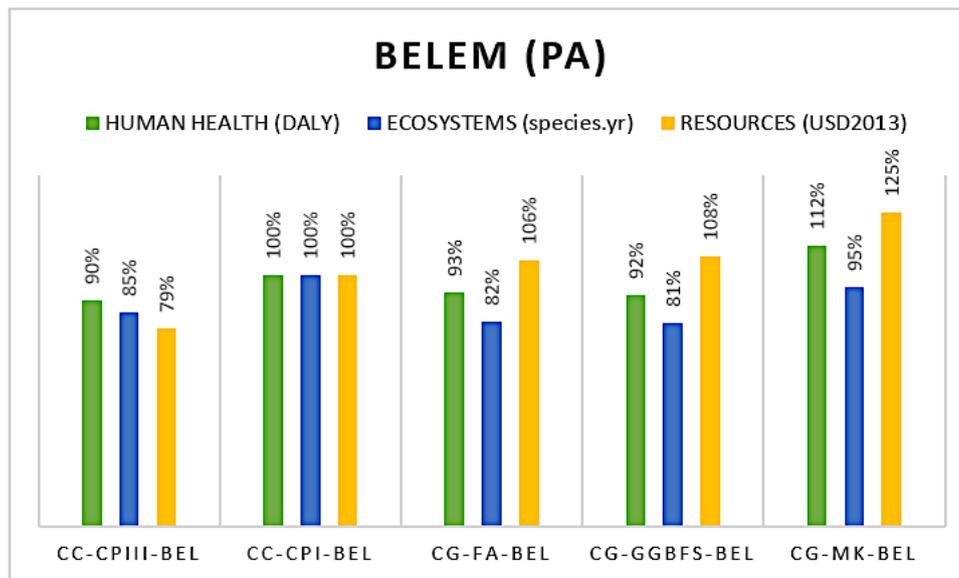
Recife, assim como Porto Alegre, demonstrou bons resultados gerais. Esse desempenho positivo ocorre novamente por conta da disponibilidade próxima de matéria-prima. Portanto, conclui-se que existe viabilidade ambiental para a produção dos concretos geopoliméricos em Recife/PE, sendo o CG-GGBFS-REC o mais recomendável.

3.5 RESULTADOS PARA BELÉM

Para a cidade de Belém, Pará, o produto com melhor desempenho ambiental foi o concreto convencional a base de cimento CIII (CC-CPIII-BEL), demonstrando os melhores indicadores em *human health* e *resources*, ficando bem próximo do melhor indicador em *ecosystems*.

Nesse cenário é importante destacar que as distâncias são maiores até a usina proposta e, ainda assim, os concretos geopoliméricos demonstraram ser competitivos em relação aos concretos convencionais. Porém, vale destacar que na região, devido à falta de recursos naturais, as usinas concreteiras geralmente não usam a brita como matéria-prima do concreto, usando somente o seixo rolado. Nessa avaliação, todos os traços utilizaram possuíam britas em sua composição, portanto o resultado final do comparativo não foi impactado.

Figura 6. Resultados para Belém/PA



Fonte: Autores. Nota: CC-CPIII-BEL: Concreto Convencional CPIII em Belém; CC-CPI-BEL: Concreto Convencional CPI em Belém; CG-FA-BEL: Concreto Geopolimérico de Cinza Volante em Belém; CG-GGBFS-BEL: Concreto Geopolimérico de Escória Granulada de Alto Forno em Belém; CG-MK-BEL: Concreto Geopolimérico de Metacaulim em Belém.

Os resultados da cidade de Belém demonstram, assim como em outras cidades, que o investimento na produção de material localmente pode reduzir consideravelmente o impacto ambiental dos concretos geopoliméricos, tornando esse produto mais viável ambientalmente e economicamente.

Nesse cenário as distâncias entre as matérias-primas e a usina são muito grandes, sendo as maiores entre todos os comparativos. Por conta disso, os concretos avaliados em Belém possuem o pior resultado no comparativo global. Uma solução para a redução desse impacto ambiental seria a utilização de matérias-primas locais, que ocasionariam na mudança do traço.

Portanto, conclui-se que, devido às grandes distâncias percorridas pelos materiais precursores dos concretos geopoliméricos, em Belém/PA, esses produtos possuem viabilidade ambiental quando comparado ao concreto convencional a base de CPI (CC-CPI-BEL), mas não possuem um bom desempenho se comparados ao CC-CPIII-BEL.

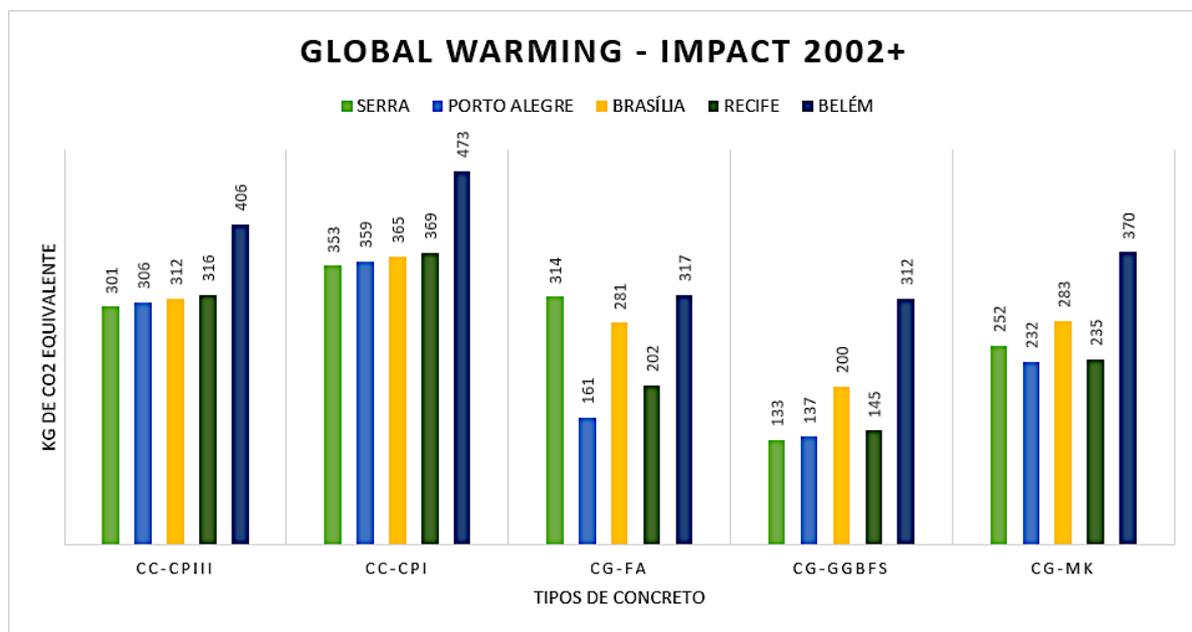
3.5 COMPARATIVO GERAL DO POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL

A categoria de impacto com maior relevância no cenário global atual é justamente o potencial de aquecimento global. Portanto, se faz necessário uma demonstração de resultados mais sintetizada e de fácil compreensão.

Para essa pesquisa foram avaliados diversos cenários, porém separados. Para uma melhor compreensão, este capítulo traz um comparativo entre todos os traços dos concretos na categoria *global warming* (potencial de aquecimento global) através da metodologia de impacto IMPACT 2002+, que gera resultados na unidade de medida Kg de CO² equivalente.

A Figura 7 demonstra o impacto na categoria aquecimento global de todos os traços de concretos avaliados, desde os convencionais até os geopoliméricos.

Figura 7. Comparativo na categoria *global warming*



Fonte: Autores. Nota: CC-CPIII: Concreto Convencional CPIII; CC-CPI: Concreto Convencional CPI; CG-FA: Concreto Geopolimérico de Cinza Volante; CG-GGBFS: Concreto Geopolimérico de Escória Granulada de Alto Forno; CG-MK: Concreto Geopolimérico de Metacaulim.

Como pode ser observado, a cidade com o pior desempenho é Belém, mas isso se deve por conta das grandes distâncias até de matérias-primas simples, como o agregado graúdo. É possível que a produção de um traço utilizando matérias-primas locais possa reduzir o impacto ambiental dos materiais. Apesar disso, os CG demonstraram resultados superiores aos CC.

Em contraponto, a cidade com melhor desempenho geral é Porto Alegre, por ter uma grande disponibilidade de matéria-prima próxima da usina concreteira avaliada. Recife demonstrou bons resultados, bem próximos aos encontrados no Sul, e esse cenário também possui disponibilidade de matéria-prima local. Os resultados positivos nos locais com maior disponibilidade de matéria-prima demonstram o peso do impacto do transporte para o resultado final da avaliação do ciclo de vida. Nesses cenários, todos os CG obtiveram resultados melhores que os CC na categoria avaliada, *global warming*.

Brasília, apesar da distância dos ativadores até a usina, mostrou que os concretos geopoliméricos possuem viabilidade ambiental, com o resultado positivo podendo ser majorado em caso de disponibilidade de matéria-prima em algum lugar mais próximo da usina, como nos outros casos avaliados. Nesse caso os CC se aproximam dos resultados dos CG, exceto no CG-GGBFS-BRA, que foi o produto com melhor desempenho.

Para a Serra, o CG-GGBFS-SER foi o produto que apresentou os resultados mais satisfatórios. Nesse cenário, a fonte de escória está a 10 km da usina concreteira, o que influenciou nos resultados finais. Vale ressaltar o único CG que apresentou um resultado inferior ao CC foi o CG-FA-SER em relação ao CC-CPIII-SER.

Em relação aos tipos de concretos, o material com melhor desempenho geral foi o concreto geopolimérico a base de escória granulada de alto forno, obtendo bons resultados em todas as cidades, quando comparados aos concretos convencionais e até mesmo aos próprios concretos geopoliméricos a base de outros materiais precursores. Em contraponto, o concreto com pior desempenho geral foi o concreto convencional de cimento Portland CPI, que demonstrou os piores resultados em relação aos outros concretos, em todos os cenários avaliados.

Para melhorar o desempenho dos concretos avaliados é importante identificar os fluxos com maior impacto final na produção. Para os CC-CPIII e CC-CPI o material de maior impacto foi o cimento, sendo responsável por cerca de 85% do potencial de aquecimento global. Nos CG é possível observar um impacto considerável nos ativadores, sendo responsáveis por até 50% do impacto, dependendo da distância até a usina concreteira. Para minimizar essa contribuição é importante modernizar os processos de fabricação e disponibilizar locais mais próximos como fonte.

Com base no objetivo foram delineados os parâmetros para aplicação da ACV. Avaliando as simulações *midpoints* e, posteriormente, transformando esses dados em *endpoints*, foi observado que, na maioria dos casos, os concretos geopoliméricos conseguiram obter um ganho ambiental em relação aos concretos convencionais. Vale ressaltar que essa redução nos impactos se deu mesmo com a grande distância dos materiais precursores, principalmente os ativadores, dos concretos geopoliméricos em relação as usinas.

Dessa forma, foi observado que:

Dessa forma, foi observado que:

a) Para a cidade de Serra, Espírito Santo, o produto com melhor desempenho ambiental foi o concreto geopolimérico a base de escória granulada de alto forno (CG-GGBFS-SER), e isso se deve ao fato desse material ser um coproduto industrial e sua disponibilidade está a apenas 10 km da usina proposta para esse cenário. Conforme analisado na revisão bibliográfica e nos resultados obtidos com o OpenLCA, a distância da matéria-prima impacta diretamente o resultado final da ACV.

O CG-GGBFS-SER poderia ter um impacto ambiental ainda menor caso os ativadores fossem produzidos no próprio estado (Espírito Santo), e não em São Paulo (1.023 km) e Rio de Janeiro (596 km). Mesmo com essas distâncias o concreto geopolimérico gerou um dano ambiental

menor que o concreto convencional a base de cimento CPIII (CC-CPIII-SER), que é amplamente conhecido pela sua redução de custos e impacto ambiental em relação ao concreto convencional a base de cimento CPI (CC-CPI-SER).

Os demais concretos geopoliméricos não obtiveram resultados positivos na comparação. No caso do concreto a base de cinza volante (CG-FA-SER) isso se deve à distância do material precursor até a usina, 2.490 km. Da mesma forma, o material precursor do geopolimérico de metacaulim (CG-MK-SER) está a 426 km.

Portanto, conclui-se que, na cidade de Serra, Espírito Santo, o CG-GGBFS-SER já possui viabilidade ambiental, podendo ser majorada caso haja uma produção local dos ativadores.

b) Para a cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, o produto com melhor desempenho ambiental foi o concreto geopolimérico a base de escória granulada de alto forno (CG-GGBFS-POR), mas nesse cenário é importante destacar que o concreto geopolimérico a base de cinza volante (CG-FA-POR) também apresentou uma grande redução de impactos ambientais.

No cenário avaliado, o material precursor do CG-GGBFS-POR está a 42 km da usina, o que contribuiu para a grande redução nos impactos que esse produto obteve em relação ao concreto convencional a base de CPI (CC-CPI-POR). O CG-FA-POR, apesar de ter seu material precursor a 400 km da usina, se mostrou ambientalmente viável. Os ativadores, em contraponto ao cenário anterior, possuem uma distância de deslocamento muito menor, sendo 2 km para o hidróxido de sódio e 277 km para o silicato de sódio. Essas distâncias influenciam muito no resultado comparativo final.

Em Porto Alegre apenas o concreto geopolimérico a base de metacaulim não apresentou resultados favoráveis, apesar de ter obtido uma redução na categoria *ecosystems*. Essa cidade possui uma vasta quantidade de indústrias e isso contribuiu para que houvesse a redução das distâncias de deslocamentos das matérias-primas e, conseqüentemente, os concretos geopoliméricos obtiveram um desempenho ambiental superior aos concretos convencionais, tendo os resultados inclusive melhores que na avaliação do cenário anterior, para a cidade de Serra. Portanto, conclui-se que o CG-GGBFS-POR e CG-FA-POR possuem viabilidade ambiental para sua produção em Porto Alegre.

c) Em Brasília, Distrito Federal, o produto com melhor desempenho ambiental foi o concreto geopolimérico a base de escória granulada de alto forno (CG-GGBFS-BRA), porém na categoria *resources* ele possui um desempenho inferior aos concretos convencionais, por conta da distância da matéria-prima até a usina (844 km).

Apesar de ser a capital do Brasil, Brasília é uma cidade fora do eixo industrial, o que aumenta o impacto ambiental e onera a produção do concreto geopolimérico. Os ativadores percorrem uma distância de 1.081 km, mas ainda assim, o CG-GGBFS-BRA conseguiu obter um resultado positivo em relação ao concreto convencional a base de cimento CPI (CC-CPI-BRA).

Esse cenário possui uma situação semelhante ao cenário da Serra. Existe a viabilidade ambiental, ainda que seja menor, porém ela pode ser majorada caso a produção dos materiais precursores ocorra em um local mais próximo da usina de produção de concreto. Mas, devido à distância da escória, o concreto convencional a base de cimento CPIII (CC-CPIII-BRA) passa a ser uma opção mais segura em relação aos outros.

Portanto, conclui-se que, devido às grandes distâncias que o material precursor dos concretos geopoliméricos têm que percorrer – 844 km para a escória, 627 km para o metacaulim, 1.803 km para a cinza volante –, em Brasília o concreto com a maior viabilidade é o CC-CPIII-BRA.

d) Para a cidade de Recife, Pernambuco, o produto com melhor desempenho ambiental é o concreto geopolimérico a base de escória granulada de alto forno (CG-GGBFS-REC), demonstrando obter os melhores indicadores em todas as categorias de impacto *endpoints* avaliadas.

Nesse cenário, e em todos os outros, o concreto convencional de CIII (CC-CIII-REC) também demonstrou uma redução de impactos quando comparado ao CPI (CC-CPI-REC), mas, ainda assim, obtendo indicadores piores que os concretos geopoliméricos de cinza volante (CG-FA-REC) e escória granulada de alto forno (CG-GGBFS-REC).

A produção do CG-FA-REC gerou uma redução de danos nas categorias de impacto *human health* e *ecosystems*, tendo um resultado 2% acima em *resources*. Vale ressaltar que nesse cenário todos os concretos geopoliméricos demonstraram vantagem em alguma categoria. O CG-GGBFS-REC obteve redução em todas as categorias de impacto, o CG-FA-REC nas duas categorias citadas nesse parágrafo e o concreto geopolimérico a base de metacaulim (CG-MK-REC) gerou redução de danos em *ecosystems*.

Portanto, conclui-se que existe viabilidade ambiental para a produção dos concretos geopoliméricos em Recife/PE, sendo o CG-GGBFS-REC o mais recomendável.

e) Para a cidade de Belém, Pará, o produto com melhor desempenho ambiental foi o concreto convencional a base de cimento CIII (CC-CIII-BEL), demonstrando os melhores indicadores em *human health* e *resources*, ficando bem próximo do melhor indicador em *ecosystems*.

Nesse cenário é importante destacar que as distâncias são maiores até a usina proposta e, ainda assim, os concretos geopoliméricos demonstraram ser competitivos em relação aos concretos convencionais. Porém, vale destacar que na região, devido à falta de recursos naturais, as usinas concreteiras geralmente não usam a brita como matéria-prima do concreto, usando somente o seixo rolado. Nessa avaliação, todos os traços utilizaram possuíam britas em sua composição, portanto o resultado final do comparativo não foi impactado.

Os resultados da cidade de Belém demonstram, assim como em outras cidades, que o investimento na produção de material localmente pode reduzir consideravelmente o impacto ambiental dos concretos geopoliméricos, tornando esse produto mais viável ambientalmente e economicamente.

Portanto, conclui-se que, devido as grandes distâncias percorridas pelos materiais precursores dos concretos geopoliméricos, em Belém/PA, esses produtos possuem viabilidade ambiental quando comparado ao concreto convencional a base de CPI (CC-CPI-BEL), mas não possuem um bom desempenho se comparados ao CC-CIII-BEL.

Conforme avaliado nesta pesquisa, na maioria dos casos os concretos geopoliméricos possuem viabilidade ambiental para serem produzidos, em relação ao concreto convencional feito com cimento CPI, mas é necessário observar outras opções no mercado, como o concreto feito com cimento CIII, que em alguns casos obteve um desempenho ambiental melhor que os concretos geopoliméricos e em todos os cenários obteve um desempenho superior ao concreto de CPI.

A ampliação da produção dos materiais precursores beneficiaria os concretos geopoliméricos e viabilizariam ainda mais sua fabricação, reduzindo seus custos por conta das distâncias de transporte. Por conter processos químicos em sua produção, os danos em outras categorias ainda são altos, porém, dentro de um ambiente industrial controlado, poderiam ser minimizados com otimizações específicas desses processos.

Conforme citado nesta pesquisa, os concretos geopoliméricos não possuem somente um bom potencial ambiental, mas também são mais resistentes ao fogo e a ataques químicos, sendo interessante para edificações com essas demandas.

Em síntese, o material avaliado na presente pesquisa possui viabilidade de produção na maioria dos cenários, com destaque para o concreto geopolimérico produzido com escória granulada em alto forno. Mas ainda possui como concorrente outros concretos feitos com cimento convencional como o CPIII, que, através de adições no ligante, consegue obter um bom desempenho ambiental com um custo menor.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme avaliado nesta pesquisa, na maioria dos casos os concretos geopoliméricos possuem viabilidade ambiental para serem produzidos, em relação ao concreto convencional feito com cimento CPI, mas é necessário observar outras opções no mercado, como o concreto feito com cimento CPIII, que em alguns casos obteve um desempenho ambiental melhor que os concretos geopoliméricos e em todos os cenários obteve um desempenho superior ao concreto de CPI.

A ampliação da produção dos materiais precursores beneficiaria os concretos geopoliméricos e viabilizariam ainda mais sua fabricação, reduzindo seus custos por conta das distâncias de transporte. Por conter processos químicos em sua produção, os danos em outras categorias ainda são altos, porém, dentro de um ambiente industrial controlado, poderiam ser minimizados com otimizações específicas desses processos.

Conforme citado nesta pesquisa, os concretos geopoliméricos não possuem somente um bom potencial ambiental, mas também são mais resistentes ao fogo e a ataques químicos, sendo interessante para edificações com essas demandas.

Em síntese, o material avaliado nesta pesquisa possui viabilidade de produção na maioria dos cenários, com destaque para o concreto geopolimérico produzido com escória granulada em alto forno. Mas ainda possui como concorrente outros concretos feitos com cimento convencional como o CPIII, que, através de adições no ligante, consegue obter um bom desempenho ambiental com um custo menor.

REFERÊNCIAS

Abbas, R., et al. (2020). Preparation of geopolymer concrete using Egyptian kaolin clay and the study of its environmental effects and economic cost. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22, 669-687.

Aequus Consultoria. 28º Anuário de finanças dos municípios capixabas. Vitória, 2022. Recuperado de http://aequus.com.br/anuarios/capixabas_2022.pdf

Alsaman, A., et al. (2021). Energy and CO2 emission assessments of alkali-activated concrete and Ordinary Portland Cement concrete: A comparative

analysis of different grades of concrete. *Cleaner Environmental Systems*, 3, 100047.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR ISO 14040: Gestão ambiental-avaliação do ciclo de vida-princípio e estrutura. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR ISO 14044. Gestão ambiental-Avaliação do ciclo de vida-Requisitos e orientações. ABNT.

Bajpai, R., et al. (2020). Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based

- geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120147.
- Bernardi, V. F. (2014). *A sustentabilidade com a recuperação e valorização de cacos e casqueiros provenientes de mármore e granito*. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- Bianco, I., Tomos, B. A. D., & Vinai, R. (2021). Analysis of the environmental impacts of alkali-activated concrete produced with waste glass-derived silicate activator—A LCA study. *Journal of cleaner production*, 316, 128383.
- Bribán, I. Z., et al. (2010). Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46, 1133-1140.
- Castel, A. (2016). *Bond between steel reinforcement and geopolymer concrete*. Handbook of Low Carbon Concrete.
- Collins, F. & Sanjayan, J. G. (1999). Effects of ultra-fine materials on workability and strength of concrete containing alkali-activated slag as the binder. *Cement and concrete research*, 29(3), 459-462.
- Colangelo, F., et al. (2021). Eco-efficient industrial waste recycling for the manufacturing of fibre reinforced innovative geopolymer mortars: Integrated waste management and green product development through LCA. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127777.
- Dal Pozzo, A., et al. (2019). Life cycle assessment of a geopolymer mixture for fireproofing applications. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24, 1743-1757.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2006). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal Materials Science*, 42, 2917-2933.
- Dollente, I. J. R., Tan, R. R., & Promentilla, M. A. B. (2021). Life cycle assessment of precast geopolymer products. *Chemical Engineering Transactions*, 88, 799-804.
- Fernando, S., et al. (2021). Life cycle assessment and cost analysis of fly ash—rice husk ash blended alkali-activated concrete. *Journal of environmental management*, 295, 113140.
- Fernando, S., et al. (2022). Environmental evaluation and economic analysis of fly ash-rice husk ash blended alkali-activated bricks. *Environmental impact assessment review*, 95, 106784.
- Garces, Jerome Ignatius T. et al. Life cycle assessment of self-healing geopolymer concrete. *Cleaner Engineering and Technology*, v. 4, p. 100147, 2021.
- Gomes, K. C., et al. (2019). Carbon emissions associated with two types of foundations: CP-II Portland cement-based composite vs. geopolymer concrete. *Matéria* (Rio de Janeiro), 24(4), e12525.
- Habert, G., De Lacaillerie, JB D.'Espinose, & Roussel, N. (2011). An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of cleaner production*, 19(11), 1229-1238.
- Huang, W. & Wang, H. (2022). Multi-aspect engineering properties and sustainability impacts of geopolymer pervious concrete. *Composites Part B: Engineering*, 242, 110035.
- Imtiaz, L., et al. (2021). Life cycle impact assessment of recycled aggregate concrete, geopolymer concrete, and recycled aggregate-based geopolymer concrete. *Sustainability*, 13(24), 13515.
- Ipam. Quais são as principais fontes de gases de efeito estufa decorrentes das atividades humanas? Belém, 05 de novembro de 2015. Recuperado de <https://ipam.org.br/entenda/quais-sao-as-principais-fontes-de-gases-de-efeito-estufa-decorrentes-das-atividades-humanas-2/>
- Jolliet, O., et al. (2003). Impact 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *International Journal of LCA*, 8(6), 324-330.
- Kastiukas, G., et al. (2020). Development of precast geopolymer concrete via oven and microwave radiation curing with an environmental assessment. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120290.
- Komkova, A. & Habert, G. (2023). Environmental impact assessment of alkali-activated materials: Examining impacts of variability in constituent production processes and transportation. *Construction and Building Materials*, 363, 129032.
- Kua, H. W. & Kamath, S. (2014). An attributional and consequential life cycle assessment of substituting concrete with bricks. *Journal of Cleaner Production*, xx, 1-11.
- Kurtoglu, A. E., et al. (2018). Mechanical and durability properties of fly ash and slag based geopolymer concrete. *Advances in concrete construction*, 6(4), 345.
- Labianca, C., et al. (2022). Alkali-activated binders—a sustainable alternative to OPC for stabilization and solidification of fly ash from municipal solid waste incineration. *Journal of Cleaner Production*, 380, 134963.
- Longhi, M. A. (2015). *Álcali-ativação de lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo*. Dissertação (mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Marinković, S., et al. (2017). Environmental assessment of green concretes for structural use. *Journal of Cleaner Production*, 154, 633-649.

- Medeiros-Junior, R. A., Lima, M. G., Medeiros, M. H. F., & Rea, L. V. (2014). Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. *Revista Alconpat*, 4(2), 116-132.
- Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M. (2008). *Concreto. Microestrutura, Propriedades e materiais*. Tradução de Cristina Borba. 3ª. ed. São Paulo: Ibracon. ISBN 978- 85-98576-12-1.
- Meshram, R. B. & Kumar, S. (2022). Comparative life cycle assessment (LCA) of geopolymers cement manufacturing with Portland cement in Indian context. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(6), 4791-4802.
- Mohajerani, A., Suter, D., Jeffrey-Bailey, T., Song, T., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., & Law, D. (2019). Recycling waste materials in geopolymer concrete. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(3), 493-515.
- Munir, Q., et al. (2023). A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of geopolymer concrete produced from industrial side streams in comparison with traditional concrete. *Science of The Total Environment*, 865, 161230.
- Ortiz, O., et al. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, 23, 28-39.
- Passuello, A., et al. (2017). Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators. *Journal of Cleaner Production*, 166, 680-689.
- Patrisia, Y., et al. (2022). Life cycle assessment of alkali-activated concretes under marine exposure in an Australian context. *Environmental Impact Assessment Review*, 96, 106813.
- Petrillo, A., et al. (2016). An environmental evaluation: a comparison between geopolymer and CC concrete paving blocks manufacturing process in Italy. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 35(6), 1699-1708.
- Petrillo, A., et al. (2016). Eco-sustainable geopolymer concrete blocks production process. *Agriculture and agricultural science procedia*, 8, 408-418.
- Rebitzer, G., et al. (2004). Life cycle assessment Part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis and applications. *Environment International*, 30, 701-720.
- Robayo-Salazar, R., et al. (2018). 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*, 176, 103-111.
- Sandanayake, M., et al. (2018). Greenhouse gas emissions of different fly ash based geopolymer concretes in building construction. *Journal of cleaner production*, 204, 399-408.
- Shi, C., Qu, B., & Provis, J. L. (2019). Recent progress in low-carbon binders. *Cement and Concrete Research*, 122, 227-250.
- Shi, X., et al. (2021). Life cycle assessment and impact correlation analysis of fly ash geopolymer concrete. *Materials*, 14(23), 7375.
- Shobeiri, V., et al. (2021). A comprehensive assessment of the global warming potential of geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126669.
- Salas, D., A. et al. (2018). Life cycle assessment of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 190, 170-177.
- Shobeiri, V., et al. (2021). A comprehensive assessment of the global warming potential of geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126669.
- Shehata, N., et al. (2022). Geopolymer concrete as green building materials: Recent applications, sustainable development and circular economy potentials. *Science of the Total Environment*, 155577.
- Silva, F. B., et al. (2020). Avaliação do ciclo de vida do concreto dosado em central com base em dados da indústria brasileira. *Concreto & Construções*, 98, 91-97.
- Siddique, R. & Iqbal Khan, M. (2011). Metakaolin. In: Supplementary Cementing Materials. *Engineering Materials*, 37. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Takano, A., et al. (2014). Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment. *Building and Environment*, 79, 20-30.
- Teh, S. H., et al. (2017). Hybrid life cycle assessment of greenhouse gas emissions from cement, concrete and geopolymer concrete in Australia. *Journal of cleaner production*, 152, 312-320.
- Turner, L. K. & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and CC cement concrete. *Construction and building materials*, 43, 125-130.
- Yao, Y., et al. (2020). Life cycle assessment of 3D printing geo-polymer concrete: An ex-ante study. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 116-127.
- Zahmak, A., et al. (2021). Environmental performance of alkali-activated binders for ground improvement. *Transportation Geotechnics*, 31, 100631.
- Zanellato, F. C. (2016). *Avaliação do ciclo de vida cradle-to-gate de traços de concretos autoadensáveis com incorporação de resíduos e subprodutos industriais*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 174p.