ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Desempenho ambiental da produção dos cimentos ternários à base de argila calcinada e resíduos de mármore

Environmental performance of the production of ternary cements based on calcined clay and waste from marble

Sheila Miranda Correia Souza
Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS | Feira de Santana | Brasil | sheilamiranda725@gmail.com
Kaio Sales de Tancredo Nunes
Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS | Feira de Santana | Brasil | kaiosaleseng@gmail.com
Susane Eterna Leite Medeiros
Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS | Feira de Santana | Brasil | selmedeiros@uefs.br
Diego Lima Medeiros
Universidade Federal do Maranhão - UFMA | Balsas | Brasil | diego.lm@ufma.br
Tiago Assunção Santos
Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS | Feira de Santana | Brasil | tasantos1@uefs.br

Resumo

A indústria cimenteira tem potencial de redução da extração de matéria-prima e seus impactos ambientais ao utilizar resíduos sólidos. Este estudo avaliou o desempenho ambiental ao substituir o filer calcário na produção do cimento *Limestone Calcined Clay Cement* (LC^3), pelo resíduo de mármore. Comparou-se os impactos ambientais entre diferentes formulações: referência (cimento Portland comum), LC^3 e LC^3-R, cimento com resíduo de mármore (substituição de 15% de calcário). A análise ambiental foi do berço ao portão, incluindo a extração/aquisição das matérias-primas até a produção do cimento. Utilizando o *software* OpenLCA e o banco de dados Ecoinvent 3.6, a avaliação considerou categorias como potencial de aquecimento global (GWP100a) e extração de recursos naturais (depleção abiótica). O cimento ternário produzido com resíduo de mármore causou menos impacto ambiental, com redução de 39% nas emissões de gases de efeito estufa em comparação com o cimento convencional e de 1,2% em relação ao LC^3 sem a presença do resíduo. Quanto ao consumo de recursos naturais, houve diminuição de 45% em comparação com o cimento convencional e de 13% em relação ao LC^3 sem o resíduo.

Como citar:
SOUZA, S. M. C. Desempenho ambiental da produção dos cimentos ternários à base de argila calcinada e resíduos de mármore. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2024.

Palavras-chave: *Limestone Calcined Clay Cement* (LC^3). Resíduos. Mármore. Impactos ambientais.

Abstract

The cement industry has the potential to reduce raw material extraction and its environmental impacts by using solid waste. This study evaluated the environmental performance by replacing limestone filler in the production of Limestone Calcined Clay Cement (LC^3) with marble waste. Environmental impacts were compared among different formulations: reference (ordinary Portland cement), LC^3, and LC^3-R *with marble waste (15% limestone replacement). The environmental analysis was cradle-to-gate, including raw material extraction/acquisition to cement production. Using OpenLCA software and the Ecoinvent 3.6 database, the evaluation considered categories such as global warming potential (GWP100a) and abiotic resource depletion. The ternary cement produced with marble waste caused less environmental impact, with a 39% reduction in greenhouse gas emissions compared to conventional cement and 1,2% compared to LC^3 without the waste. Regarding natural resource consumption, there was a 45% decrease compared to conventional cement and 13% compared to LC^3 without the waste.*

Keywords: Limestone Calcined Clay Cement (LC^3). Waste. Marble. Environmental impacts.

INTRODUÇÃO

Atualmente, há uma crescente preocupação com as questões ambientais e a necessidade de adotar práticas mais sustentáveis em diversos setores da sociedade, especialmente no setor da construção civil. O cimento Portland, um dos materiais mais utilizados nesse setor, é o segundo material mais utilizado globalmente [1].

Em 2022, a produção global de cimento atingiu 4,1 bilhões de toneladas [2], com o Brasil contribuindo com cerca de 63,5 milhões de toneladas, sendo a Bahia responsável por aproximadamente 1,3 milhões de toneladas [3]. No entanto, essa produção em larga escala gera significativos impactos ambientais, devido à extração intensiva de recursos naturais como calcário, argila, gipsita, água e combustíveis fósseis [4].

Além disso, a produção de cimento também é responsável por elevadas emissões de dióxido de carbono (CO_2), o principal gás de efeito estufa, contribuindo para o fenômeno do aquecimento global. Segundo o Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa (2021), em nível global, as emissões de CO_2 provenientes da indústria de cimento representam aproximadamente 7-8% das emissões totais produzidas pelo homem. No cenário brasileiro, essa participação equivale a 2,6% [5].

Por esse motivo, a indústria do cimento tem adotado o uso de matérias-primas alternativas, conhecidas no setor como Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), que incluem resíduos industriais como cinzas volantes, escórias e sílica ativa e recursos naturais como calcário, pozolanas e metacaulim [6]. Esses MCS têm contribuído para reduzir a proporção de clínquer/cimento, e consequentemente, reduzir os impactos ambientais gerados pela produção do cimento [6]. O aumento do uso do MCS permitiu que o Brasil reduzisse a relação clínquer cimento de 84% para 71%, resultando em uma redução das emissões de CO_2 de 700 kg.CO_2 eq./t.cimento para 564 kg.CO_2 eq./t.cimento, referente ao ano de 2019 [7].

Neste contexto, surge o *Limestone Calcined Clay Cement* (LC^3), composto por 50% de clínquer, 30% de argila calcinada, 15% de calcário e 5% de gipsita em termos de

proporção em massa. Conforme a literatura, o clínquer pode ser substituído por MCS em até 50% e ainda assim proporcionar propriedades mecânicas comparáveis às do cimento Portland [8]. Além disso, pesquisas têm investigado a viabilidade de incorporar resíduos no cimento ternário como alternativas ao filer calcário, como cinza de lenha de algaroba [9] e resíduos de mármore [10] e como alternativas a argila calcinada, como resíduo de argilas [11] e resíduo cerâmico [12]. Esses estudos ressaltam a diversidade de materiais que podem ser utilizados nesse tipo de cimento, oferecendo uma perspectiva promissora para a indústria da construção civil em termos de sustentabilidade e redução de impactos ambientais.

Em 2018, a produção global bruta de rochas ornamentais atingiu a marca de 154,5 milhões de toneladas, gerando em torno de 313 milhões de toneladas de rochas extraídas em todo o mundo [13]. O Brasil ocupa a 5ª posição entre os países que mais produzem pedras naturais, sendo responsável por 5,3% da produção mundial [14]. Dentro desse cenário, a produção de rochas carbonáticas representa 2,3 milhões de toneladas de toda produção de rochas ornamentais no Brasil e o mármore que mais se destaca é o Bege Bahia, também conhecido como Travertino Nacional [14].

No entanto, esse setor também enfrenta um desafio ambiental. Estima-se que a produção dessas rochas gera uma quantidade alarmante de resíduos, variando entre 690.000 e 920.000 toneladas [15]. Essa realidade representa um sério problema ao meio ambiente, apresentando um elevado impacto ambiental e à saúde quando descartado de maneira inadequada [16][17]. Os resíduos de mármore têm potencial de substituir o calcário na produção de cimento LC^3, pois o mármore é composto por diversos carbonatos, como calcita e dolomita, compostos químicos também encontrados no calcário [10]. Estudos indicam que os resíduos provenientes de rochas calcíticas e dolomíticas são eficazmente aplicáveis como fonte de carbonato em misturas LC^3, resultando em uma melhor resistência à compressão [10].

Desta forma, este estudo tem como objetivo avaliar os impactos associados à produção de cimento ternário com resíduo de mármore. A proposta visa integrar esse resíduo na produção de cimento, oferecendo uma solução para os impactos ambientais gerados por ambas as indústrias. Esse processo não apenas representa uma abordagem sustentável, mas também contribui para a promoção de uma economia circular, onde os resíduos são transformados em matérias-primas para a produção de um novo produto, minimizando assim o impacto negativo no meio ambiente.

MÉTODO

Este estudo avaliou a viabilidade de utilizar o resíduo de mármore como fonte de carbonato em misturas ternárias de cimento, substituindo o calcário. Foram comparados os impactos ambientais com dois tipos de cimento: o cimento Portland comum (CPC) e cimento de argila calcinada e calcário (LC^3).

Para analisar as etapas do processo de produção do cimento convencional e dos ternários, foi adotada a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) com o objetivo de

compreender como os impactos ambientais se propagam ao longo de todo o processo produtivo, seguindo as diretrizes normativas da ISO 14040/44. A composição de cada cimento utilizado no estudo é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 Misturas utilizadas no estudo: cimento Portland comum (CPC), cimento de argila calcinada e calcário (LC^3) e cimento de argila calcinada e resíduo de mármore (LC^3-R)

Nome	Clínquer (%)	Argila calc. (%)	Gipsita (%)	Calcário (%)	RM (%)
CPC	95	-	5	-	-
LC^3	50	30	5	15	-
LC^3-R	50	30	5	-	15

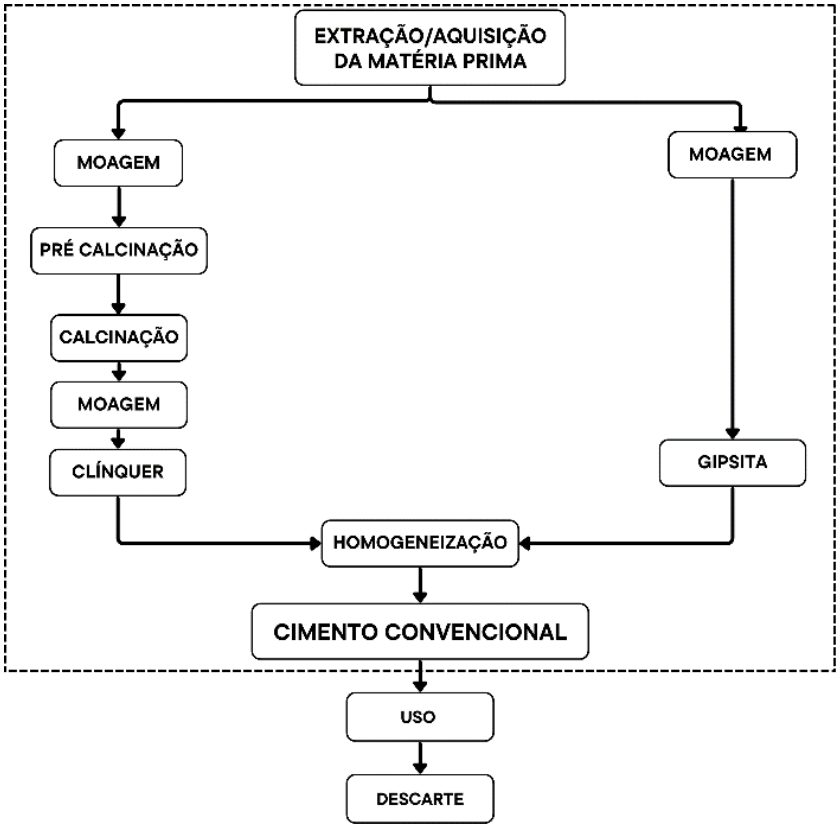
Fonte: o autor.

A abordagem da ACV possibilitou a análise detalhada das implicações ambientais associadas à produção de cimento.

ESCOPO

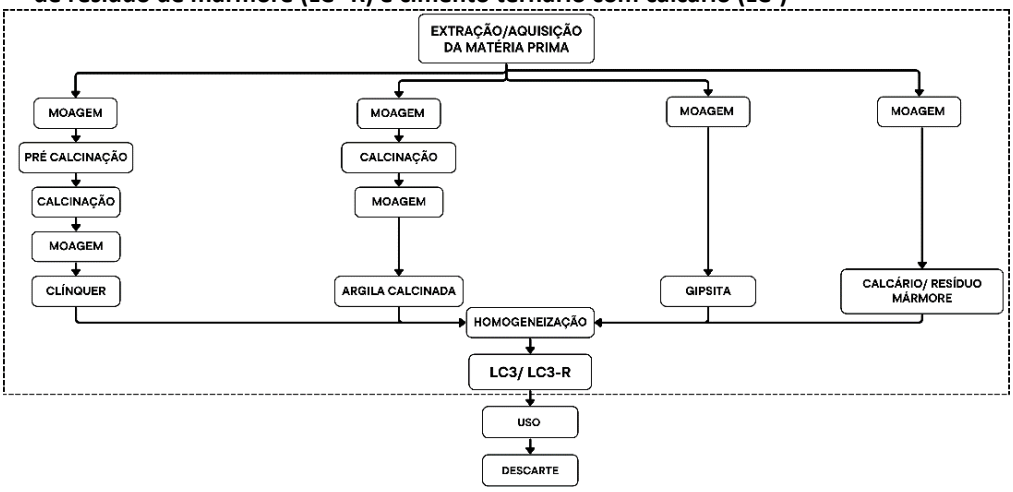
A análise ambiental foi realizada com o intuito de comparar o desempenho ambiental da produção do cimento ternário com resíduo de mármore bege bahia (LC^3-R) com o convencional comum (CPC) e cimento de argila calcinada e calcário (LC^3), conforme as Figuras 1 e 2.

Figura 1 Fronteira do sistema para a produção de 1 tonelada de cimento convencional



Fonte: o autor.

Figura 2 Fronteira do sistema para a produção de 1 tonelada de cimento ternário com adição de resíduo de mármore (LC^3-R) e cimento ternário com calcário (LC^3)



Fonte: o autor.

A fronteira do sistema deste estudo é delimitada seguindo a abordagem "do berço ao portão", ou seja, desde a extração das matérias-primas até a produção de 1 tonelada de cimento convencional, conforme ilustrado na Figura 1, bem como no cimento ternário com resíduos de mármore, conforme ilustrado na Figura 2.

Para os propósitos deste estudo, foi considerado o transporte médio das matérias-primas por meio da seleção provedor *market*, que inclui os transportes médios dos insumos dentro da geografia. Em relação aos resíduos, foi assumido que o transporte é nulo, pois o gerador do resíduo se encarrega de transportar o material até a fábrica de cimento. Além disso, não foram considerados também a aplicação e utilização do cimento, a disposição final e seu potencial de reciclagem.

ANÁLISE DO INVENTÁRIO E AVALIAÇÃO DE IMPACTO

Para avaliar e calcular os impactos ambientais, foi adotado o método CML 2001. Esse método classifica e quantifica os impactos ambientais, possibilitando uma análise aprofundada e computacionalmente precisa das consequências ambientais. Esta pesquisa se concentra exclusivamente nas categorias de impacto relacionadas à extração de recursos naturais e às emissões de gases poluentes na atmosfera.

Para a realização do inventário, foram consideradas apenas fluxos de entrada. Assim, é importante informar que as saídas não foram contabilizadas. Além disso, a construção da planta industrial, os serviços de manutenção e o descomissionamento da fábrica de cimento também foram desconsiderados. Essa abordagem limita a análise apenas aos aspectos de entrada de materiais, sem considerar os impactos e processos associados às saídas e à infraestrutura necessária para a operação da planta.

Para a definição dos processos, fluxos de entrada e cálculos de inventário, foi utilizado o *software OpenLCA*, uma ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de código aberto, que permite, aos usuários, modelar sistemas complexos para avaliações ambientais detalhadas, utilizando o banco de dados Ecoinvent v.3.6. Foram utilizadas informações de fornecedores: *RoW* (*Rest of the World*) e Brasil (BR). Os detalhes específicos das entradas para os processos de produção do cimento Portland

convencional, do cimento ternário (LC^3) e cimento ternário com resíduos (LC^3-R), são apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4, respectivamente.

Tabela 2 Inventário do processo de produção do cimento Portland convencional

Fluxos de entrada	Unid.	Quant.	Fonte (*provider*)
Clínquer	t.	0.95	*market for clinker- Cutoff, U- BR*
Gipsita	t.	0.05	*market for gypsum, mineral- Cutoff, U- RoW*

Nota: *Rest of the word (RoW)*, Brasil (BR). Fonte: o autor.

Tabela 3 Inventário do processo de produção do cimento ternário (LC^3)

Fluxos de entrada	Unid.	Quant.	Fonte (*provider*)
Clínquer	t.	0.50	*market for clinker- Cutoff, U- BR*
Gipsita	t.	0.05	*market for gypsum, mineral- Cutoff, U- RoW*
Argila Calcinada	t.	0.30	*market for calcined clay- Cutoff, U- BR*
Calcário	t.	0.15	*market for limestone, crushed, washed- Cutoff, U- RoW*

Nota: *Rest of the word (RW)*, Brasil (BR). Fonte: o autor.

Tabela 4 Inventári do processo de produção do cimento ternário com resíduos (LC^3-R)

Fluxos de entrada	Unid.	Quant.	Fonte (*provider*)
Clínquer	t.	0.50	*market for clinker- Cutoff, U- BR*
Gipsita	t.	0.05	*market for gypsum, mineral- Cutoff, U- RoW*
Argila Calcinada	t.	0.30	*market for calcined clay- Cutoff, U- BR*
Resíduos de mármore bege bahia	t.	0.15	Subdivisão de processo: sem carga ambiental

Nota: *Rest of the word (RW)*, Brasil (BR). Fonte: o autor.

Na avaliação da categoria de impacto relacionada ao consumo de recursos naturais, como minerais e metais, foi considerada a Depleção Abiótica. Essa categoria é utilizada para mensurar a redução na disponibilidade de recursos não biológicos. A unidade de medida utilizada foi em quilogramas de equivalente de antimônio por unidade funcional de cimento (kg.Sb.eq/UF.cimento). Para a categoria de impacto relacionada ao aquecimento global, foi analisado o *Global Warming Potential* - GWP 100, que representa o Potencial de Aquecimento Global ao longo de 100 anos. A unidade de medida adotada foi em quilogramas de dióxido de carbono equivalente por unidade funcional de cimento (kg.CO_2.eq/UF.cimento).

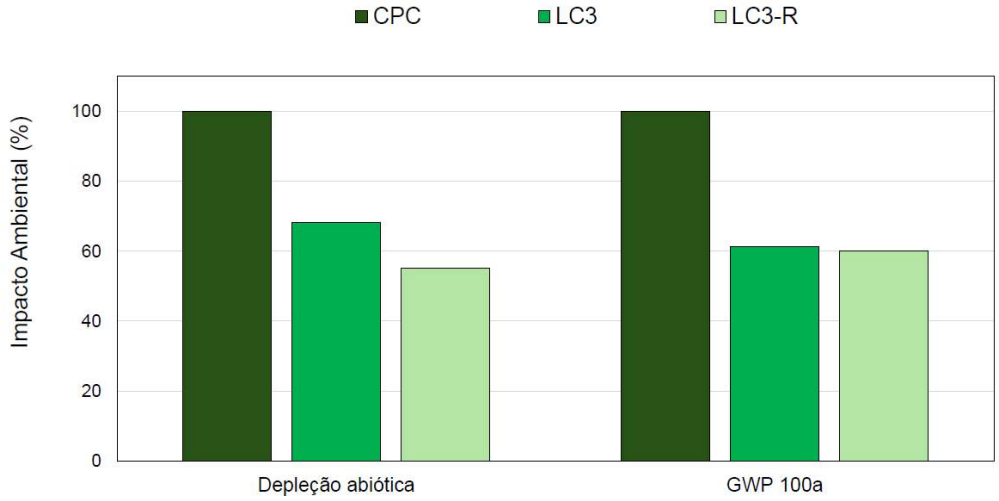
No contexto da gestão de resíduos, é importante ressaltar que o cimento CPC e o LC^3 não incorporam resíduos em sua composição, o que implica no transporte e descarte

desses resíduos em aterros. Em contrapartida, o LC^3-R se destaca por utilizar resíduos de mármore em sua formulação, eliminando assim a necessidade de descarte em aterros. Foi desconsiderado o transporte do resíduo, dessa forma, o fluxo de transporte foi assumido como zero.

RESULTADOS

Na análise do inventário do impacto gerado pela produção dos cimentos CPC, LC^3 e LC^3-R, os dados referentes ao impacto absoluto por tonelada de cimento estão disponíveis na Figura 3, em porcentagem. Foram analisadas as diferenças relativas entre os diversos tipos de cimento, tendo o CPC como ponto de referência. O efeito do CPC é delineado com o intuito de estabelecer uma comparação com um cimento isento de resíduos e minerais.

Figura 3 Análise comparativa dos resultados relativos da depleção abiótica e potencial de aquecimento global (GWP 100a) em porcentagem, entre os cimentos, tendo como referência o CPC. CPC: cimento Portland comum, LC^3: Cimento de argila calcinada e calcário, LC^3-R: Cimento de argila calcinada e resíduo de mármore, em porcentagem. Transporte não incluído



Fonte: o autor.

Como resultado, o cimento convencional possui os impactos ambientais relacionados à depleção abiótica mais significativos em comparação com os demais cimentos analisados. O cimento LC^3, por sua vez, demonstrou uma redução de 31,68% nesse tipo de impacto em relação ao CPC. Já o LC^3-R apresentou uma redução ainda mais expressiva, atingindo 44,94% em relação ao CPC e 13,26% em relação ao LC^3. Essa diferença pode ser atribuída à composição do cimento convencional, que possui um teor de clínquer mais elevado em comparação com o LC^3 e o LC^3-R. Estes últimos substituem cerca de 50% do clínquer por outros materiais, como argila calcinada, calcário e resíduos de mármore, contribuindo significativamente para a redução dos impactos ambientais relacionados à depleção abiótica.

Embora a discrepância entre os resultados do LC^3 e o LC^3-R não tenha sido significativa, destaca-se que a adoção de resíduos confere uma vantagem ambiental significativa. Essa abordagem minimiza a extração de novos materiais do meio ambiente, como é o

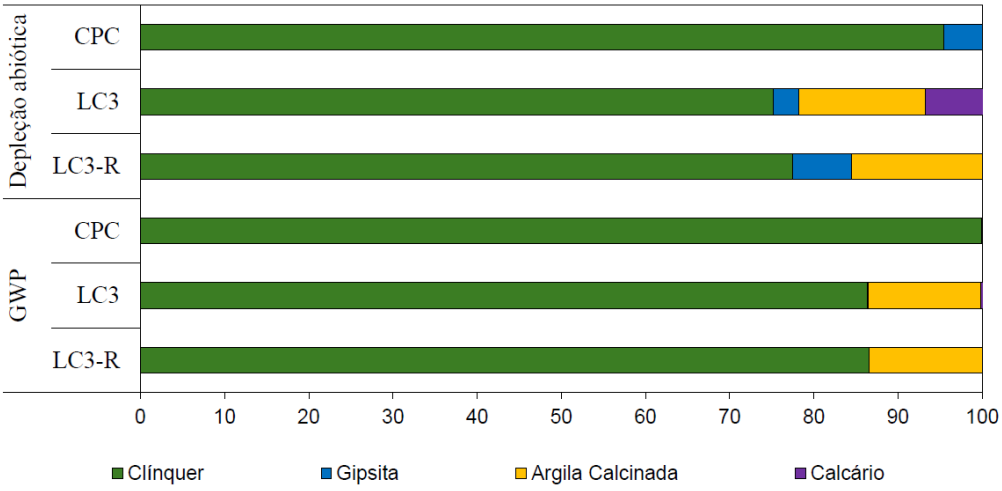
caso da extração do calcário que pode resultar em diversos danos ambientais, como a destruição da vegetação, a perda de água e a erosão do solo [18]. No entanto, o LC^3-R não requer essa extração, pois utiliza resíduos de mármore em vez de calcário, evitando assim os impactos ambientais associados à extração desse recurso.

Além disso, a adição de resíduos de mármore na matriz cimentícia resultou em resistência à compressão superior à do cimento Portland comum [19]. Na produção de cimento LC^3, investigou-se o uso desses resíduos de mármore, indicando que podem ser eficazmente empregados como fonte de carbonato em misturas de LC3, promovendo a estabilização da etringita e a formação de carboaluminatos [20]. Quanto à durabilidade, estudos demonstraram melhorias significativas no concreto com pó de mármore, que apresentou maior resistência física e durabilidade. Observou-se que o pó de mármore proporcionou uma mistura densa e eficaz, contribuindo assim para aprimorar as propriedades a longo prazo [21][22].

De forma análoga ao que foi identificado na categoria de depleção abiótica, uma tendência similar se manifesta na categoria de impacto referente ao Potencial de Aquecimento Global (GWP). As emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas ao CPC, se destacam como o principal contribuinte nesse cenário. Com aproximadamente 876,4 kg.CO_2 eq./t.cimento, o CPC apresenta uma elevação com cerca de 39% em comparação com os cimentos LC^3 e LC^3-R, correspondendo respectivamente a 537,5 kg.CO_2 eq./t.cimento e 526,7 kg.CO_2 eq./t.cimento. Esta diferença apresenta semelhança com um estudo anterior, no qual foi apontada uma diferença média de aproximadamente 38% em relação aos cimentos LC^3 [11].

A contribuição percentual de cada processo ou matéria-prima nos impactos totais é apresentada na Figura 4 para melhor compreensão dos fatores que contribuem para o resultado total.

Figura 4 Contribuição percentual de cada processo e matéria-prima no total de impactos. CPC: cimento Portland comum, LC^3: Cimento de argila calcinada e calcário, LC^3-R: Cimento de argila calcinada e resíduo de mármore. Transporte não incluído



Fonte: o autor.

O fluxo correspondente à produção do clínquer representou a parcela predominante, destacando a produção de clínquer como a principal fonte de extração de recursos naturais. Em seguida, a calcinação da argila emergiu como outra fonte significativa de depleção abiótica, contribuindo com aproximadamente 15% para o impacto total dos cimentos LC^3 e LC^3-R. Esse fenômeno está diretamente relacionado ao teor de caulinita presente nas argilas, o qual influencia a quantidade de matéria-prima necessária para obter uma quantidade equivalente de argila calcinada. Quanto maior o teor de caulinita, maior a perda de massa durante o processo de calcinação, resultando na necessidade de uma quantidade mais substancial de massa inicial para atingir o valor preciso na composição do cimento ternário, correspondente a 30% do peso total [23].

De forma semelhante ao que foi observado na categoria de depleção abiótica, uma tendência análoga é observada na categoria de impacto relacionada ao GWP, onde a produção de clínquer representa a maior parte, destacando-a como a principal fonte de GEE na cadeia produtiva do cimento. No cimento CPC o fluxo do clinquer é responsável por mais de 90% das emissões de CO_2, confirmando estudos que associam essas emissões aos processos termoquímicos envolvidos na produção de clínquer [24]. Isso evidencia que quanto maior a proporção de clínquer na composição do cimento, mais significativo será o impacto ambiental associado.

A calcinação da argila surge como uma fonte relevante de emissões de gases de efeito estufa, contribuindo com aproximadamente 13% para o impacto ambiental total. Na literatura, foram observadas emissões equivalentes a 66 a 184 kg.CO_2 eq./t.cimento [23], variando devido ao teor de caulinita presente na composição da argila [23]. Porém, neste estudo observou-se o valor equivalente a 70,54 kg.CO_2 eq./t.cimento.

Conforme observado, o calcário contribui apenas com 0,16% para o impacto total das emissões de gases poluentes na produção de cimento LC^3, indicando que esse fluxo não exerce uma influência significativa nas emissões. Um estudo com objetivo e escopo diferente deste trabalho, que substituiu o calcário por resíduos de licor verde (RLV), resíduo proveniente da indústria de celulose e papel, para a produção de clínquer, não resultou em uma diminuição significativa no GWP. Sendo atribuído à composição do resíduo, que é composto por 85% de calcita, contribuindo para o impacto ambiental negativo da mesma forma que o calcário [25].

A substituição do calcário por resíduos na produção do LC^3-R não resulta em uma diminuição expressiva das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que a contribuição já era baixa no cimento LC^3. No entanto, a produção de LC^3-R reduz a necessidade de mineração de calcário, o que minimiza danos geográficos causados por explosões na extração desse recurso e tem um impacto significativo sobre a biodiversidade. Além disso, essa prática contribui para evitar o descarte desses resíduos no meio ambiente e reduzir a acidificação do solo.

CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo aprofundar a compreensão do desempenho ambiental de um cimento ternário, composto por argila calcinada e resíduos de mármore. Ao

analisar essa combinação específica, foi possível identificar como ela influencia a eficiência do processo de produção de cimento e avaliar suas implicações ambientais. Utilizando métodos de análise de ciclo de vida, foram analisadas as categorias de impacto de depleção abiótica e GWP-100a. Foram realizadas comparações entre o cimento Portland comum (CPC), o *Limestone Calcined Clay Cement* (LC^3) e o cimento ternário à base de argila calcinada e resíduos de mármore Bege Bahia (LC^3-R).

No contexto brasileiro, o resultado das comparações do LC^3-R, quanto à depleção de recursos naturais, resultou em uma redução significativa de 45,0% em comparação com o CPC e 13,0% em relação ao LC^3. Quanto às emissões de gases de efeito estufa (GEE), houve uma redução de 39,0% em comparação com o CPC e com uma variação de apenas 1,2% em relação ao LC^3.

Essa abordagem destaca várias vantagens ambientais significativas do LC^3-R, especialmente devido ao seu baixo teor de clínquer na composição. O clínquer é conhecido por ser o principal contribuinte para as emissões de GEE na produção de cimento. A utilização de resíduos em substituição ao calcário elimina a necessidade de extração de recursos naturais e reduz o impacto ambiental associado ao descarte inadequado de resíduos.

Recomenda-se a realização de investigações adicionais para avaliar os potenciais impactos em outras categorias de impacto ambiental, além das emissões de GEE, como consumo de água e uso de energia.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pelo apoio financeiro concedido à pesquisa. Agradecem também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Ambiental (PPGCEA) e à Universidade Estadual de Feira de Santana pelo suporte institucional e acadêmico.

REFERÊNCIAS

[1] SCRIVENER, K.L.; JOHN, V.M.; GARTNER, E.M. Eco-Efficient Cements: Potential Economically Viable Solutions for a low-CO2 Cement- Based Materials Industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2-26, 2018.

[2] LEWIN, R. Complexity: life at the edge of chaos. 2. ed. Chicago: University of Chicago Press, 2000. U.S. Geological Survey. **Mineral Commodity Summaries**. United States, 2023. Disponível em <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-cement.pdf.> Acesso em 10 de outubro de 2023.

[3] SNIC- Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento. **Produção Nacional de Cimento por Regiões e Estados**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1691430860.pdf.> Acesso em: 27 de setembro de 2023.

[4] JYOSYULA, S.K.R.; SURANA. S.; RAJU, S. Role of Lightweight Materials of Construction on Carbon Dioxide Emission of a Reinforced Concrete Building. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 984-990, 2020.

[5] BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Resultados do inventário nacional de emissões de gases de efeito estufa por unidade federativa Relatório de atividades. Brasília, DF: Ministério da Justiça, 2022.

[6] SNIC, Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento. **Relatório anual 2021**. 2022. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2021.pdf.> Acesso em: 27 de setembro de 2023.

[7] SNIC, Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento. **Roteiro Tecnológico do Cimento para o Brasil- 2019.** Rio de Janeiro, 2019. Disponível em <https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Roadmap_Tecnologico_Cimento_Brasil_Book-1.pdf.> Acesso em 26 de setembro de 2023.

[8] SCRIVENER, K.L.; JOHN, V.M.; GARTNER, E.M. Eco-Efficient Cements: Potential Economically Viable Solutions for a low-CO2 Cement- Based Materials Industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2-26, 2018.

[9] BEZERRA, G. G.; QUEIROZ, M. G. C.; OLIVEIRA, M. A. A.; MARINHO, E. P.; LIMA, N. B.; NÓBREGA, A. C. V. Reuso de cinza de lenha de algaroba como fíler calcário alternativo no desenvolvimento de cimento LC^3. **Cerâmica**, 69 (391), p. 224–232. Scielo, 2023.

[10] KRISHNAN, S.; KANAUJIA, S. K.; MITHIA, S.; BISHNOI, S. Hydration kinetics and mechanisms of carbonates from stone wastes in ternary blends with calcined clay. **Construction and Building Materials**, v. 164, p. 265-274, 2018.

[11] MALACARNE, Camila Salvi. **Desenvolvimento e caracterização de cimentos LC3 – cimentos ternários a base de argila calcinada e calcário – a partir de matérias primas do Rio Grande do Sul.** Dissertação de Pós-Graduação - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

[12] FROHLICH, J. **Uso de resíduo cerâmico em cimentos ternários tipo LC3: estudo dos produtos da hidratação.** Dissertação de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo, 2019.

[13] MONTANI, C. XXXI Rapporto Marmo e Pietre Nel Mondo 2020. **Aldus: Carrara (IT)**, p. 151, 2021.

[14] ABIRROCHAS- Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **O Desempenho Brasileiro no Setor de Rochas Ornamentais**. Brasília, DF. ABIROCHAS, 2021.

[15] RAMOS, J. C. R.; PASSALINI, P. G. S.; HOLANDA, J. N. F. Utilization of marble waste as a sustainable replacement for calcareous in the manufacture of red-firing wall tiles. **Construction and Building Materials**, v. 377,2023.

[16] VIDAL, F. W. H., AZEVEDO, H. C. A., CASTRO, N. F. (Eds). **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. 700p.

[17] MULK, S.; KORAI, A. L.; AZIZULLAH, A.; SHANI, L.; KHATTAK, M. N. K. Marble industry effluents cause an increased bioaccumulation of heavy metals in Mahaseer (Tor putitora) in Barandu River, district Buner, Pakistan. **Environ Sci Pollut Res**, v. 24, p. 23039–23056, 2017.

[18] LI, G., XU, X., CHEN, E., FAN, J., XIONG, G. Properties of cement-based bricks with oyster-shells ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 91, p. 279 – 287, 2015.

[19] ARUNTAŞ, H. Y.; GÜRÜ, M.; DAYI, M.; TEKIN, I. Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. **Materials & Design**, v. 31, p. 4039-4042, 2010.

[20] KRISHNAN, S.; KANAUJIA, S. K.; MITHIA, S.; BISHNOI, S. Hydration kinetics and mechanisms of carbonates from stone wastes in ternary blends with calcined clay. **Construction and Building Materials**, v. 164, p. 265-274, 2018.

[21] ASHISH, D. K.; Concrete made with waste marble powder and supplementary cementitious material for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 716-729, 2019.

[22] SINGH, M.; SRIVASTAVA, A.; BHUNIA, D. Long term strength and durability parameters of hardened concrete on partially replacing cement by dried waste marble powder slurry. **Construction and Building Materials**, v. 198, p. 553-569, 2019.

[23] MALACARNE, Camila Salvi. et al. Environmental and technical assessment to support sustainable strategies for limestone calcined clay cement production in Brazil. **Construction and Building Materials**, v. 310, p. 125-261, 2021.

[24] GAO, T.; DAI, T.; SHEN, L.; JIANG, L. Benefits of using steel slag in cement clinker production for environmental conservation and economic revenue generation. **J. Clean. Prod,** v. 282, 2021.

[25] SRIVASTAVA, S.; MOUKANNAA, S.; ISTERI, V.; RAMTEKE, D.D.; PERUMAL, P.; ADESANYA, D.; KINNUNEN, P.; OHENOJA, K.; ILLIKAINEN, M. Utilization of calcite-rich Green Liquor Dregs (GLD) by-products from pulp and paper industry: Cement clinker production and life cycle analysis. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, 2024.