AVALIAÇÃO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE CIMENTO BELÍTICO COM LAMA DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS E LAMA DE CARBONATO DE CÁLCIO

Environmental evaluation of belitic cement production with ornamental rock processing sludge and calcium carbonate sludge

Francisco Roger Carneiro Ribeiro
Universidade Federal do Rio Grande do Sul | Porto Alegre, Rio Grande do Sul | roger.ribeiro_@hotmail.com

Marilise Garbin
Universidade do Vale do Rio dos Sinos | São Leopoldo, Rio Grande do Sul | garbin.mmari@gmail.com

Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita
Universidade Federal do Ceará | Russas, Ceará | emesquita@ufc.br

Feliciane Andrade Brehm
Universidade do Vale do Rio dos Sinos | São Leopoldo, Rio Grande do Sul | felicianeb@unisinos.br

Carlos Alberto Mendes Moraes
Universidade do Vale do Rio dos Sinos | São Leopoldo, Rio Grande do Sul | cmoraes@unisinos.br

Regina Célia Espinosa Modolo
Universidade do Vale do Rio dos Sinos | São Leopoldo, Rio Grande do Sul | reginaem@unisinos.br

Resumo

Inúmeros resíduos sólidos industriais possuem composições químicas similares aos materiais utilizados na produção de cimento Portland e cimento belítico, nomeadamente calcário e argila, podendo minimizar os impactos ambientais diante da exploração de recursos naturais e a geração de emissões de dióxido de carbono na indústria cimenteira. Nesta pesquisa, objetivou-se realizar uma avaliação ambiental, por meio da ferramenta de avaliação do ciclo de vida, da produção de cimentos belíticos com lama do beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO) em substituição a argila e lama de carbonato de cálcio (LCC) como reposição do calcário em escala laboratorial. Os resultados indicam que as devidas substituições reduzem os impactos ambientais associados ao processo, principalmente no que diz respeito às categorias de mudanças climáticas, ecotoxidade da água doce e uso de recursos fósseis, enquanto o uso do solo e da água permaneceram constantes. Além disso, os valores obtidos fornecem à indústria do cimento e aos tomadores de decisão uma melhor compreensão dos ganhos ambientais da produção de cimentos belíticos com materiais alternativos, como medida de fomentar a produção de materiais de construção mais sustentáveis.

Palavras-chave: Lama do beneficiamento de rochas ornamentais; Lama de carbonato de cálcio; Cimento belítico; Avaliação ambiental.

ABSTRACT

Numerous industrial solid wastes have chemical compositions similar to those used in producing Portland cement and war cement, namely limestone and clay, which can minimize environmental impacts due to the exploitation of natural resources and carbon dioxide emissions in the cement industry. In this research, the objective was to carry out an environmental assessment, using the life cycle assessment tool, of the production of belitic cement with ornamental rock processing sludge (ORPS) replacing clay and calcium carbonate sludge (CCS) as limestone replacement on a laboratory scale. The results indicate that appropriate replacements reduce the environmental impacts associated with the process, mainly regarding the categories of climate change, freshwater ecotoxicity, and use of fossil resources, while the use of soil and water remained constant. Furthermore, the values obtained provide the cement industry and decision-makers with a better understanding of the environmental gains of producing war cement with alternative materials to promote the production of more sustainable construction materials.

Keywords: Ornamental rock processing sludge; Calcium carbonate sludge; Belitic cement; Environmental assessment.

1 INTRODUÇÃO

Dentre os resíduos potenciais para a produção de cimentos ecoeficientes, como o cimento belítico, encontram-se a lama do beneficiamento de rochas ornamentais e a lama de carbonato de cálcio. O primeiro resíduo sólido é oriundo do corte e polimento de rochas ornamentais e o segundo resíduo sólido é oriundo da indústria de celulose e papel através do processo *Kraft*. A produção de cimentos belíticos possuem uma menor pegada de dióxido de carbono (CO_2) por consistir em um aglomerante com uma menor demanda de calcário de alta qualidade, menor demanda de energia, menor temperatura de clinquerização, menor calor de hidratação nas primeiras idades de hidratação, maior produção de C-S-H e durabilidade prolongada (CUESTA et al., 2021; RIBEIRO et al., 2022; REDONDO-SOTO et al., 2022).

Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia padronizada internacionalmente que permite analisar os impactos ambientais de produtos ou serviços ao longo do seu ciclo de vida a partir de uma perspectiva holística (ABNT ISO 14040, 2009; ABNT ISO 14044, 2009). Consequentemente, é uma metodologia adequada para identificar os pontos chaves ambientais e possíveis estratégias de mitigação em diferentes setores da construção civil. Embora o uso de resíduos sólidos como materiais alternativos na produção de cimento seja praticado há algum tempo, ainda há uma falta de estudos abrangentes na literatura sobre os efeitos ambientais de tais substituições na produção desse ligante. Assim sendo, o objetivo deste estudo é avaliar os impactos ambientais potenciais associados ao uso concomitante da lama do beneficiamento de rochas ornamentais e da lama de carbonato de cálcio na produção de cimento belítico em escala laboratorial por meio da ACV.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As matérias-primas utilizadas foram: calcário calcítico, argila caulinítica, lama do beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO) e lama de carbonato de cálcio (LCC). O equilíbrio dos óxidos desses materiais para o preparo da composição da farinha crua de clínquer foi calculado de acordo com os módulos químicos: fator de saturação de cal (FSC), módulo de sílica (MS) e módulo de alumina (MA). As composições desenvolvidas podem ser encontradas na Tabela 1. A temperatura de sinterização foi de 1100 ºC por 290 minutos em cada ciclo conforme investigação de Ribeiro et al. (2022).

Tabela 1: Composições de cimentos belíticos investigadas

Formulações	Calcário (%)	Argila (%)	LBRO (%)	LC (%)
REF	90	10	-	-
F1	-	-	52,5	47,5
F2	5	-	50	45
F3	10	-	47,5	42,5

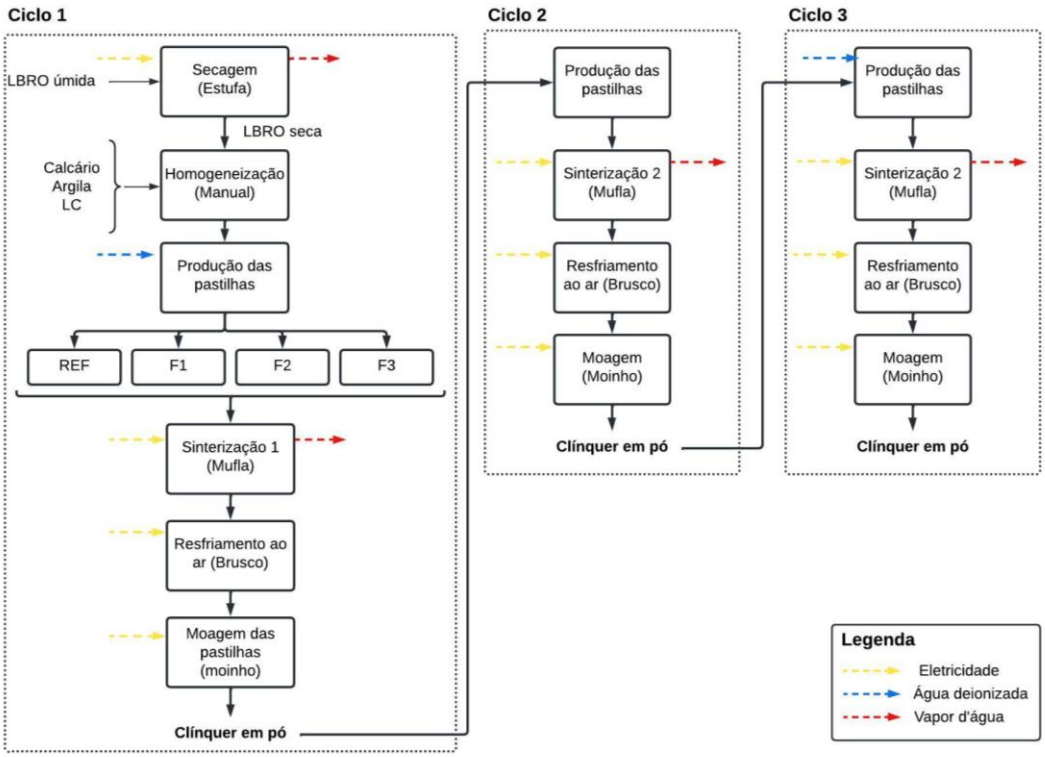
A Figura 1 apresenta o processo de obtenção dos cimentos belíticos. O escopo aplicado para o estudo foi o *cradle-to-gate*, que inclui a extração para os materiais de ocorrência natural que requerem mineração, como o calcário e a argila, e beneficiamento dos insumos até a obtenção do cimento. Para tanto, foram utilizados dados secundários e customizados para eletricidade e água conforme matriz do Brasil. Os materiais LBRO e LCC, não possuem essa carga ambiental, por serem resíduos sólidos de outras atividades industriais.

Para a modelagem do estudo foram consideradas todas as etapas do processo produtivo, dados de transporte e consumo de eletricidade. A unidade funcional (UF) considerada foi de 0,25 kg de cimento belítico, obtido ao final do processo. Os dados utilizados foram coletados *in loco* por meio de medição direta durante a execução do processo em laboratório. O estudo foi modelado no *software* SimaPro Expert 9.3.0.2, Ecoinvent 3.8.

A avaliação dos impactos ambientais potenciais foi realizada através do escopo *midpoint*, com abordagem atribucional, em que foram consideradas as 16 categorias de impacto do método EF 3.0. Essas categorias são: Mudanças Climáticas; Destruição da camada de ozônio; Radiação ionizante; Formação de ozônio fotoquímico; Material particulado; Toxicidade humana (câncer e não câncer); Acidificação; Eutrofização

(terrestre, água doce e marinha); Ecotoxicidade de água doce e; Uso da terra, água e recursos (fósseis, minerais e metais).

Figura 1: Fluxograma do processo de obtenção do cimento belítico



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentre as 16 categorias de impacto consideradas no estudo, as categorias de mudanças climáticas (kg CO_2 eq), ecotoxidade de água doce (CTUe), uso do solo (Pt), uso da água (m^3 depriv) e uso de recursos fósseis (MJ) mostraram-se como as mais significativas, apresentando os impactos ambientais potenciais de acordo com as Figuras 2 e 3.

Figura 2: Categorias de impacto com maior significância

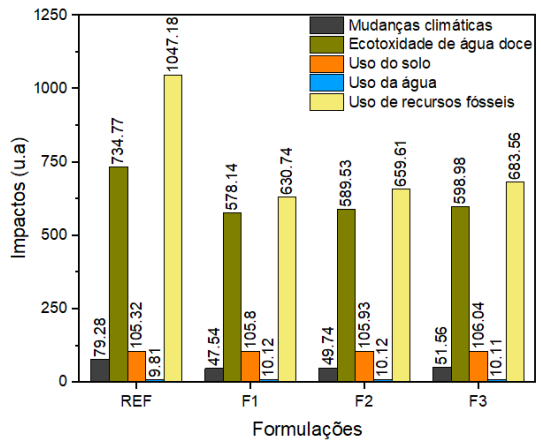
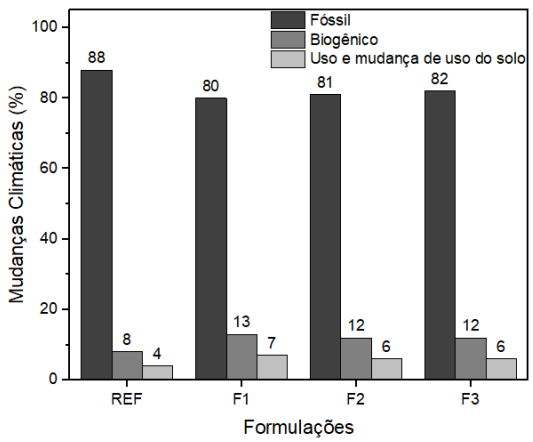


Figura 3: Avaliação da categoria de Mudanças Climáticas



Os resultados da Figura 2 mostram que as formulações de cimentos belíticos produzidos com resíduos sólidos industriais apresentaram menores impactos em relação ao cimento belítico de referência. Os ganhos ambientais variam de 35 a 40% para mudanças climáticas, de 18 a 21% para ecotoxicidade de água doce e

de 34 a 40% para o uso de recurso fósseis. A primeira categoria refere-se à quantidade total de CO_2 emitido durante o processo de produção. Isso porque o calcário libera uma maior quantidade de CO_2 nos teores fixados na composição dos cimentos belíticos, mesmo em baixa temperatura. A ecotoxicidade de água doce foi afetada pela eletricidade (74%) e transporte (26%). O uso de recursos fósseis, por sua vez, pode ser advindo da eletricidade e transporte. Uma tendência semelhante é observada para as categorias de uso do solo e da água, nas quais se mantiveram constantes, sendo provenientes da eletricidade. Esses ganhos foram alcançados a partir da substituição do calcário pela lama de carbonato de cálcio e da argila pela lama do beneficiamento de rochas ornamentais, minimizando a extração de recursos naturais não renováveis.

O Brasil possui uma área territorial com mais de 8510000 km^2 e larguras de 4320 km de leste a oeste e 4395 km de norte a sul do país (IBGE, 2022). Dadas essas distâncias, torna-se necessário considerar o impacto de transporte das matérias-primas para a produção dos materiais de construção. Explorando os dados da Figura 3, percebe-se que todas as subcategorias apresentaram impactos similares para todas as formulações avaliadas. Explorando cada subcategoria, a produção da mistura REF foi responsável por um impacto de 46,4% pelo transporte dos materiais (calcário e argila) ao laboratório e 53,5% de eletricidade. Isso ocorreu devido à dificuldade de obtenção desses materiais localmente. O transporte rodoviário de cargas impacta todas as cadeias produtivas, pois, em algum momento do seu ciclo de vida, todo produto deve utilizar transporte rodoviário para matérias-primas e insumos, entrega aos clientes ou serviços logísticos específicos (FERREIRA, 2014). Segundo a CNT (2022), 64,7% de todas as cargas foram transportadas em rodovias brasileiras. Apesar disso, sabe-se que as indústrias cimenteiras estão localizadas próximas às minas para viabilizar e maximizar o seu processo fabril.

Nas demais formulações com predominância de LBRO e LC, o impacto associado ao transporte na categoria de Mudanças Climáticas foi de 8 a 15%, uma contribuição menor quando comparada a REF (46,4%), realçando o impacto da eletricidade de 84 a 91% devido ao forno mufla utilizado para a sinterização dos clínqueres em escala laboratorial, como era esperado.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação ambiental de cimentos belíticos produzidos com lama do beneficiamento de rochas ornamentais e lama de carbonato de cálcio sob várias perspectivas revelou que:

- Há benefícios ambientais em produzir cimentos belíticos, considerando as perspectivas analisadas e diante do uso de materiais residuais com menor impacto ambiental;
- Há influência significativa do transporte de matéria-prima para a produção dos cimentos belíticos ao utilizar somente calcário e argila;
- A eletricidade contribuiu significativamente na produção dos cimentos belíticos em escala laboratorial;
- O uso da lama do beneficiamento de rochas ornamentais e lama de carbonato de cálcio podem diminuir os impactos associados aos cimentos belíticos produzidos somente com calcário e argila;
- A importância de utilizar materiais alternativos disponíveis localmente deve ser reforçado, visando minimizar o processo de extração de materiais naturais.

Este estudo pode confirmar a relevância de incluir resíduos sólidos industriais na produção de ligantes mais sustentáveis. Com isso, a indústria do cimento pode diminuir as emissões de dióxido de carbono na atmosfera, proporcionando infraestrutura e moradia para a população, bem como contribuindo para desacelerar as mudanças climáticas.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelas bolsas concedidas para o desenvolvimento desta pesquisa. A autora Regina Célia Espinosa Modolo agradece ao projeto FAPERGS 21/2551-0002149-7 (PqG/2021) e à CNPq (Bolsa de Produtividade em Pesquisa/PQ2 - Número 310369/2021-5).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14040:** Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14044:** Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Pesquisa CNT perfil empresarial 2021: transporte rodoviário de cargas. Brasília, Distrito Federal, 2022.

CUESTA, A.; AYUELA, A.; ARANDA, M.A.G. Belite cements and their activation. **Cement and Concrete Research**, v. 140, 2021.

FERREIRA, T. L. ACV do transporte rodoviário de carga: impacto das emissões do transporte de veículos ciclomotores na rota Belém-Goiânia. Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Área territorial - Brasil, Grandes Regiões, Unidades da Federação e Municípios. Rio de Janeiro, 2022.

REDONDO-SOTO, C.; GASTALDI, D.; IRICO, S.; CANONICO, F.; ARANDA, M.A.G. Belite clinkers with increasing aluminium content: Effect of calcium aluminates on calcium silicate hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 162, 2022.

RIBEIRO, F.R.C.; MODOLO, R.C.E.; KULAKOWSKI, M.P.; BREHM, F.A.; MORAES, C.A.M.; FERREIRA, V.M.; MESQUITA, E.F.T.; AZEVEDO, A.R.G.; MONTEIRO, S.N. Production of belite based clinker from ornamental stone processing sludge and calcium carbonate sludge with lower CO_2 emissions. **Materials**, v. 15, 2022.