

Desenvolvimento de protótipo para reciclagem de embalagens de cimento: do resíduo sólido ao aglomerante álcali-ativado

Ricardo Soares

Professor, Doutorando
Universidade Federal da Bahia, Brasil
ricardo.soares@ifal.edu.br
ORCID 0000-0002-7028-1042

Rosana Fialho

Professora Doutora em Engenharia Química
Universidade Federal da Bahia, Brasil
rosana.fialho@ufba.br
ORCID 0000-0001-5472-3325

Jardel Gonçalves

Professor Doutor em Estruturas
Universidade Federal da Bahia, Brasil
jardelpg@ufba.br
ORCID 0000-0003-3484-3869

Sheyla Karolina

Professora Doutora em Ciência e Engenharia dos Materiais
Instituto Federal de Alagoas, Brasil
sheyla.marques@ifal.edu.br
ORCID 0000-0001-7554-2275

Ronny Souza

Professor Doutor em Química
Instituto Federal de Alagoas, Brasil
ronny.souza@ifal.edu.br
ORCID 0000-0002-8943-0247

1

Submissão: 01/05/2026

Aceite 07/06/2026

SOARES, Ricardo; FIALHO, Rosana; GONÇALVES, Jardel; KAROLINA, Sheyla; SOUZA, Ronny.

Desenvolvimento de protótipo para reciclagem de embalagens de cimento: Do resíduo sólido ao aglomerante álcali-ativado. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, [S. l.], v. 14, n. 92, p. e2549, 2026.

DOI: [10.17271/23188472149220266303](https://doi.org/10.17271/23188472149220266303). Disponível

em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/gerenciamento_de_cidades/article/view/6303.

Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Desenvolvimento de protótipo para reciclagem de embalagens de cimento: do resíduo sólido ao aglomerante álcali-ativado

RESUMO

Objetivo – Desenvolver e apresentar um protótipo para o processamento de sacos de cimento contaminados, por meio de tratamento alcalino com solução de NaOH, visando ao seu reuso como material de construção.

Metodologia – Adotou-se uma abordagem experimental, envolvendo montagem e observação do protótipo e o tratamento alcalino do resíduo, obtenção de uma fração sólida e o reaproveitamento da solução residual de NaOH na produção de um aglomerante álcali-ativado, combinado com sílica ativa e metacaulim.

Originalidade/relevância – Sacos de cimento contaminados representam um resíduo sólido abundante nas cidades, com alternativas limitadas de reaproveitamento. O estudo aborda essa lacuna ao propor uma estratégia integrada de valorização das frações sólida e líquida.

Resultados – O protótipo processou cerca de 30 sacos de cimento com 4 L de solução de NaOH. O material sólido obtido apresentou baixa granulometria e potencial de aplicação na construção civil. A solução residual de NaOH foi reutilizada na produção de um aglomerante álcali-ativado, formando um sistema semelhante ao gel N-A-S-H, com razão molar (SiO_2/NaOH) de 6,41. O material apresentou tempo de início de pega de 51 minutos, fim de pega de 10 horas e resistência à compressão de até 1,46 MPa aos 60 dias.

Contribuições teóricas/metodológicas – O estudo demonstra a viabilidade técnica do reaproveitamento integrado dos resíduos sólido e líquido por meio de processamento alcalino.

Contribuições sociais e ambientais – Os resultados indicam potencial para mitigar o descarte de sacos de cimento e do consumo de cimento Portland, assim como pode ser uma contribuição para estratégias de economia circular na construção civil, promovendo uma gestão mais sustentável de resíduos.

PALAVRAS-CHAVE: Aglomerante. Economia circular. Sacos de cimento.

Development of a prototype for recycling cement packaging: from solid waste to alkali-activated binder

2

ABSTRACT

Objective – To develop and present a prototype for the processing of contaminated cement bags through alkaline treatment with NaOH solution, aiming at their reuse as a construction material.

Methodology – An experimental approach was adopted, involving the assembly and monitoring of the prototype and the alkaline treatment of the waste, the recovery of a solid fraction, and the reuse of the residual NaOH solution in the production of an alkali-activated binder combined with silica fume and metakaolin.

Originality/Relevance – Contaminated cement bags represent an abundant solid waste in cities, with limited reuse alternatives. This study addresses this gap by proposing an integrated strategy for the valorisation of both solid and liquid fractions.

Results – The prototype processed approximately 30 cement bags using 4 L of NaOH solution. The recovered solid material exhibited fine particle size and potential for application in construction materials. The residual NaOH solution was reused in the production of an alkali-activated binder, forming a system similar to N-A-S-H gel, with a molar ratio (SiO_2/NaOH) of 6.41. The material showed an initial setting time of 51 minutes, a final setting time of 10 hours, and compressive strength of up to 1.46 MPa at 60 days.

Theoretical/Methodological Contributions – The study demonstrates the technical feasibility of integrated reuse of solid and liquid waste streams through alkaline processing.

Social and Environmental Contributions – The results indicate potential for reducing the disposal of cement bags and the consumption of Portland cement, as well as contributing to circular economy strategies in the construction sector by promoting more sustainable waste management practices.

KEYWORDS: Binder. Circular economy. Cement bags.

Desarrollo de un prototipo para el reciclaje de envases de cemento: del residuo sólido al aglomerante álcali-activado

RESUMEN

Objetivo – Desarrollar y presentar un prototipo para el procesamiento de sacos de cemento contaminados mediante tratamiento alcalino con solución de NaOH, con el objetivo de su reutilización como material de construcción.

Metodología – Se adoptó un enfoque experimental, que incluyó el montaje y seguimiento del prototipo y el tratamiento alcalino del residuo, la obtención de una fracción sólida y la reutilización de la solución residual de NaOH en la producción de un aglomerante álcali-activado combinado con sílice activa y metacaolín.

Originalidad/Relevancia – Los sacos de cemento contaminados representan un residuo sólido abundante en las ciudades, con alternativas limitadas de reutilización. El estudio aborda esta brecha al proponer una estrategia integrada de valorización de las fracciones sólida y líquida.

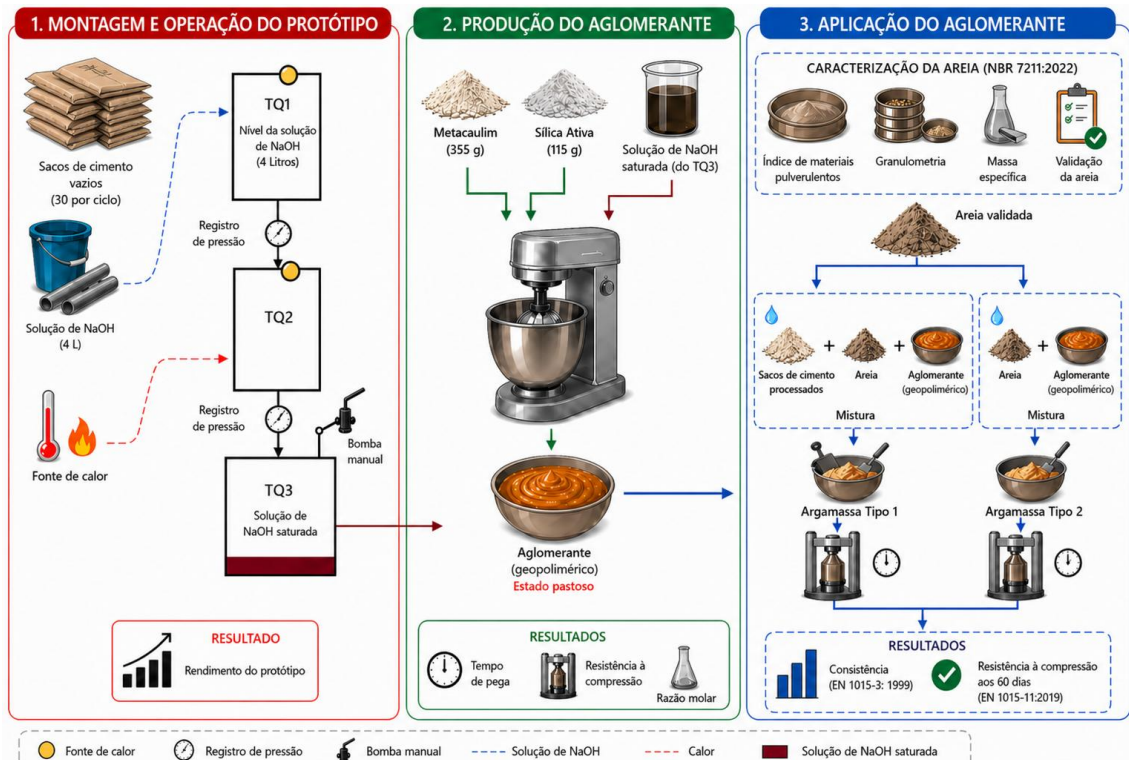
Resultados – El prototipo procesó aproximadamente 30 sacos de cemento utilizando 4 L de solución de NaOH. El material sólido recuperado presentó granulometría fina y potencial de aplicación en materiales de construcción. La solución residual de NaOH se reutilizó en la producción de un aglomerante álcali-activado, formando un sistema similar al gel N-A-S-H, con una relación molar (SiO_2/NaOH) de 6,41. El material presentó un tiempo de inicio de fraguado de 51 minutos, un tiempo final de fraguado de 10 horas y resistencia a la compresión de hasta 1,46 MPa a los 60 días.

Contribuciones teóricas/metodológicas – El estudio demuestra la viabilidad técnica de la reutilización integrada de las fracciones sólida y líquida mediante procesamiento alcalino.

Contribuciones sociales y ambientales – Los resultados indican potencial para reducir la disposición de sacos de cemento y el consumo de cemento Portland, además de contribuir a estrategias de economía circular en el sector de la construcción, promoviendo una gestión más sostenible de los residuos.

PALABRAS CLAVE: Aglomerante. Economía circular. Sacos de cemento.

RESUMO GRÁFICO

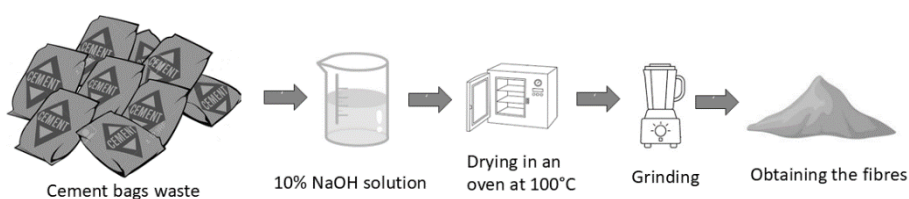


1 INTRODUÇÃO

A construção civil é uma grande geradora de resíduos devido ao emprego de materiais provenientes de diversos setores e com diferentes composições químicas. Dentre esses resíduos, destacam-se os sacos de cimento contaminados, compostos por papel multifoldado impregnado com partículas cimentícias, de difícil reciclagem por métodos convencionais, sendo geralmente destinados a aterros ou à incineração. Paralelamente, o setor é responsável por cerca de 34% do consumo global de energia e 37% das emissões de CO₂ relacionadas à energia, sendo que, isoladamente, a produção de cimento responde por aproximadamente 7% das emissões globais (UNEP, 2024). No Brasil, estima-se que quase 900 milhões de sacos de cimento foram descartados em 2024, evidenciando limitações nos sistemas de logística reversa e reaproveitamento (SNIC, 2025).

Embora existam estudos que proponham a reutilização de sacos de cimento em materiais de construção, as taxas de incorporação ainda são reduzidas (Soares *et al.*, 2024a), o que indica a necessidade de tecnologias que ampliem o reaproveitamento na própria fonte geradora, em consonância com os princípios da economia circular e com metas de neutralidade climática. Um dos métodos investigados envolve o tratamento alcalino do papel kraft com hidróxido de sódio (NaOH), conforme observado por Ji *et al.* (2018), Villar *et al.* (2025) e proposto por Soares *et al.* (2024b). Nesse processo, os sacos de papel kraft processados podem ser reutilizados como fibras em materiais termoacústicos (Fig. 1), apresentando baixa condutividade térmica (entre 0,04 e 0,08 W/m·°C). Entretanto, esse tratamento gera uma solução residual de NaOH, cujo reaproveitamento ainda é pouco explorado, podendo representar uma oportunidade para aplicação em sistemas cimentícios alternativos como aglomerantes.

Figura 1 - Esquema para tratamento de sacos de cimento com solução de NaOH.



Fonte: Adaptado de Soares *et al.* (2024b).

Os aglomerantes ativados alcalinamente (AAA), também conhecidos como geopolímeros, são obtidos a partir da reação entre precursores aluminossilicatados e soluções alcalinas, formando géis com elevada resistência mecânica e durabilidade. Esses materiais podem atingir resistências à compressão superiores a 40–60 MPa, a depender do precursor e das condições de cura (Provis & van Deventer, 2014). Além disso, apresentam melhor desempenho frente a ambientes agressivos em comparação ao cimento Portland (Bernal, 2016; Scrivener *et al.*, 2018), bem como potencial de redução das emissões de CO₂ entre 9% e 90%, dependendo da formulação e da origem dos materiais (Geraldo *et al.*, 2026). Nesse contexto, a

transição para uma economia de baixo carbono pode gerar benefícios ambientais e econômicos, além de impulsionar novos setores produtivos (Zhang *et al.*, 2024).

Marques e Benini (2026) discutem que a gestão dos resíduos da construção civil apresenta desafios para a sustentabilidade, evidenciando a necessidade de estratégias de reaproveitamento e valorização desses materiais no ciclo produtivo. Nesse cenário, este estudo propõe o desenvolvimento de um protótipo para o processamento de sacos de cimento contaminados utilizando solução alcalina de NaOH, com abordagem evolutivo em relação ao método proposto por Soares *et al* (2024c).

2 OBJETIVOS

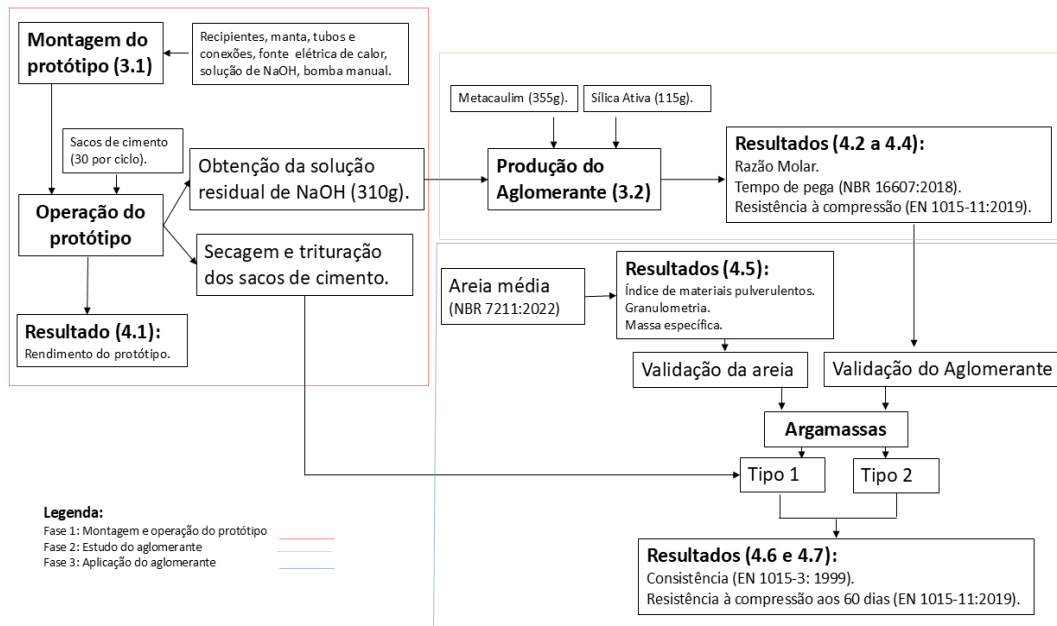
Os objetivos desta investigação são: (i) disseminar o protótipo para tratamento dos sacos de cimento; (ii) obter um material sólido com potencial de reuso; e (iii) reaproveitar a solução alcalina residual na produção de um aglomerante ativado alcalinamente à base de sílica ativa e metacaulim, demonstrando aplicação prática.

Ressalta-se que esta investigação não tem como foco a obtenção de materiais de alta resistência mecânica, mas sim a avaliação da viabilidade técnica do sistema proposto, comparando os resultados obtidos com a literatura. A estratégia adotada busca viabilizar a incorporação do aglomerante em argamassas sem cimento Portland, ampliando o potencial de reaproveitamento dos sacos de cimento tratados.

3 METODOLOGIA

A metodologia desta investigação foi estruturada em três fases principais. A Fase 1 consistiu no processamento dos sacos de cimento utilizando o protótipo desenvolvido, com foco na obtenção dos subprodutos sólidos e líquidos. A Fase 2 compreendeu a produção do aglomerante ativado alcalinamente, enquanto a sua aplicação em argamassa foi implementada na Fase 3 (Fig. 2).

Figura 2 - Fluxograma do programa experimental.

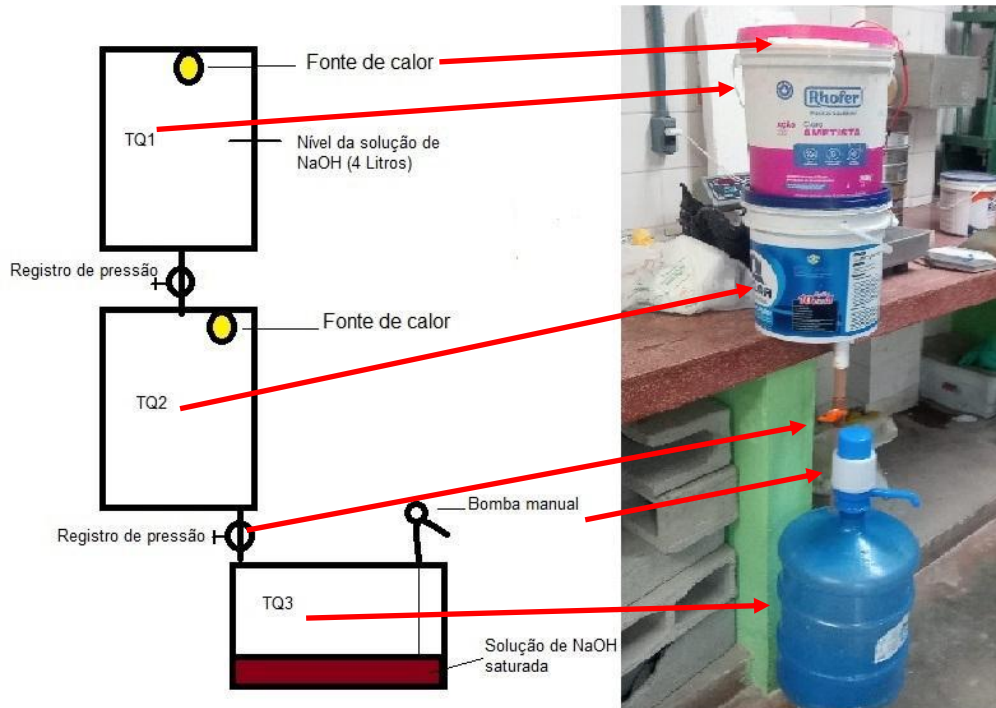


Na Fase 1, destaca-se o tratamento dos sacos de cimento por meio de solução alcalina de NaOH no protótipo desenvolvido, resultando na geração de dois subprodutos: um resíduo sólido, composto por material fibroso de baixa granulometria, e uma solução alcalina residual. Na Fase 2, a solução residual é reutilizada como agente ativador na síntese do aglomerante, em conjunto com metacaulim e sílica ativa, seguida da Fase 3 com a aplicação do material em argamassa e sua posterior caracterização. Esse arranjo experimental evidencia abordagem integrada de reaproveitamento, alinhada aos princípios de economia circular.

3.1 Montagem do protótipo

Os sacos de cimento contaminados foram coletados em obras locais e submetidos a triagem para remoção de impurezas. Para facilitar o processamento foi montado um protótipo, onde no primeiro tanque (TQ1) entram 4 litros da solução de NaOH com 10% de concentração. Esta mesma solução pode ser liberada pelo registro para o segundo tanque (TQ2), realizando um novo ciclo. A estufa usada por Soares et.al (2024b) foi substituída pela fonte de calor de uma lâmpada incandescente de 60W de potência (cerca de 6 horas), onde a energia foi conservada pelos revestimentos refratários dos tanques. Por fim, a solução de NaOH saturada pode ser liberada para o último recipiente (TQ3), que pode ser extraída por bombeamento (Fig.3).

Figura 3 - Protótipo projetado, montado e funcionando.



Fonte: Autores (2026).

O rendimento do protótipo foi avaliado pela capacidade volumétrica de processamento de resíduos por ciclo e pela quantidade de solução residual gerada ao final do processo, conforme a Equação (1).

$$\eta = V_{sol} / N_{sacos} \quad (1)$$

onde:

η = rendimento do sistema (L/saco).

V_{sol} = volume inicial da solução (L).

N_{sacos} = número de sacos processados.

Após um ciclo completo, foi verificado o volume do ativador residual, que foi utilizado como aglomerante.

3.2 Produção do aglomerante

3.2.1 Materiais

Foram utilizados, na produção do aglomerante ativado alcalinamente, os seguintes materiais: solução residual de hidróxido de sódio (NaOH) (Bradoc®), empregada como agente ativador químico; metacaulim comercial (MK2), obtido por calcinação controlada de caulim, utilizado como precursor aluminossilicato; e sílica ativa (microssílica), subproduto da produção de silício metálico, caracterizada por elevada área específica e atividade pozolânica.

O resíduo de sacos de cimento Portland, previamente processado, foi utilizado como material de interesse para avaliação de reaproveitamento no sistema. Como agregado miúdo, utilizou-se areia média normalizada, conforme ABNT NBR 7211:2022.

Para a caracterização e preparo das misturas, foram empregados: conjunto de peneiras granulométricas em aço inoxidável, conforme ABNT NBR 17054:2022; misturador mecânico tipo argamassadeira, conforme ABNT NBR 16541:2016; aparelho de Vicat para determinação dos tempos de pega, conforme ABNT NBR 16607:2018; moldes cilíndricos para corpos de prova, conforme ABNT NBR 5738:2015; e mesa de espalhamento (*flow table*), conforme EN 1015-3:1999.

Adicionalmente, foi utilizado misturador doméstico tipo liquidificador (300 W, quatro lâminas, marca Moulinex) na etapa preliminar de trituração e desagregação dos sacos de cimento.

3.2.2 Métodos

O aglomerante ativado alcalinamente (AAA) foi elaborado com base no procedimento proposto por Silva *et al.* (2024), utilizando 355g de metacaulim, 115g de sílica ativa (SiO_2) e 310g de solução residual de NaOH como agente ativador. Os materiais foram homogeneizados em argamassadeira por 60 segundos, resultando em uma pasta com consistência adequada para moldagem.

Destarte, foram moldados três corpos de prova cilíndricos com dimensões de 5×10cm, destinados à caracterização do material. O AAA foi avaliado quanto à razão molar estimada (SiO_2/NaOH), ao tempo de início e fim de pega, e à resistência à compressão aos 28 dias.

Posteriormente, o aglomerante foi utilizado na produção de argamassa, por meio da incorporação de areia média na proporção de 1:1 em massa (aglomerante:areia). A argamassa obtida foi caracterizada quanto às propriedades do agregado miúdo, à consistência no estado fresco (por meio de ensaio em mesa de espalhamento – *flow table*) e à resistência à compressão aos 60 dias.

Considerando a ausência de normas específicas para sistemas à base de aglomerantes álcali-ativados, foram adotados, por analogia, procedimentos normativos aplicáveis a materiais cimentícios convencionais. Assim, foram utilizadas as seguintes referências: ABNT NBR 16607:2018, para determinação dos tempos de pega; ABNT NBR NM 248, para análise granulométrica dos agregados; EN 1015-3:1999, para determinação da consistência da argamassa; e EN 1015-11:2019, para ensaios de resistência mecânica.

Para fins comparativos, foram produzidos dois tipos de argamassa. A argamassa do Tipo 1 foi composta por AAA e areia na proporção de 1:1 em massa, com substituição de 5% da massa da areia por material proveniente dos sacos de cimento processados, com granulometria aproximada de 1mm, com base em estudos prévios com argamassas convencionais. A argamassa do Tipo 2 foi composta exclusivamente por AAA e areia, na mesma proporção de 1:1 em massa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Rendimento do protótipo (η)

Os ensaios realizados demonstraram que o protótipo apresenta capacidade operacional para processar aproximadamente 30 sacos de cimento por ciclo completo de tratamento, utilizando volume inicial de 4 litros (L) de solução alcalina. Com base nesses valores, foi determinado rendimento (η) de 0,084L por saco de cimento processado.

Ao final do ciclo, observou-se a geração de aproximadamente 1,5L de solução residual de NaOH. Embora essa solução pudesse ser reinserida em ciclos subsequentes de processamento, neste estudo optou-se por seu reaproveitamento na produção do aglomerante álcali-ativado (AAA), visando avaliar a viabilidade de integração entre as etapas do sistema.

Esse resultado evidencia o potencial do protótipo para o processamento contínuo de resíduos, além de reforçar a viabilidade do reaproveitamento interno da solução alcalina, em consonância com estratégias de economia circular.

4.2. Razão molar estimada (SiO_2/NaOH) do AAA

A razão molar (SiO_2/NaOH) foi estimada com base no teor de sílica reativa presente nos precursores (metacaulim e sílica ativa) e na quantidade efetiva de NaOH disponível na solução alcalina a 10%. Considerando que a solução residual apresentava turbidez, impossibilitando sua determinação por titulação, e que parte do NaOH poderia ter sido absorvida pelos sacos de cimento durante o processamento, adotou-se, por aproximação, a concentração nominal inicial da solução.

Inicialmente, determinou-se a massa de SiO_2 proveniente do metacaulim, considerando teor de 55% informado pelo fornecedor, e da sílica ativa, adotando-se teor típico superior a 90% de SiO_2 . Em seguida, calculou-se o número de mols de SiO_2 a partir de sua massa molar ($60,08 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$). Para o NaOH, estimou-se a massa efetiva presente na solução e realizou-se a conversão em mols com base na massa molar de $40,00 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. A razão molar foi obtida pela relação entre os mols totais de SiO_2 e os mols de NaOH disponíveis, resultando em valor de 6,41 (Tab. 1).

Tabela 1 - Considerações e resultados da razão molar SiO_2/NaOH .

Componente	Massa (g)	Composto	(%)	Massa do composto (g)	M ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	n (mol)
Metacaulim	355	SiO_2	55	195,25	60,08	3,25
Sílica ativa	115	SiO_2	90	103,5	60,08	1,72
Total SiO_2	—	—	—	—	—	4,97
Resíduo líquido	310	NaOH	10	31	40,00	0,78
Razão molar $\text{SiO}_2/\text{NaOH} = 6,41$						

Fonte: Autores (2026).

A razão molar estimada apresentou valor superior à faixa usualmente reportada na literatura para sistemas ativados com metacaulim (Provis & van Deventer, 2014; Bernal, 2016). Estudos indicam que razões entre 2,0 e 3,5 tendem a proporcionar melhor desempenho mecânico inicial e adequada trabalhabilidade. O valor elevado obtido neste estudo está associado ao uso de solução residual de NaOH com concentração limitada, o que reduziu a disponibilidade de álcalis no sistema.

Apesar de acima da faixa considerada ótima, o material apresentou consistência pastosa adequada para moldagem dos corpos de prova, indicando que, mesmo em condições

de baixa alcalinidade relativa, foi possível promover a formação de um sistema reativo. No entanto, essa condição pode ter influenciado diretamente o desenvolvimento mecânico do material, contribuindo para os baixos valores de resistência observados. Esses resultados reforçam a importância do controle da razão molar em sistemas álcali-ativados, especialmente quando se utilizam soluções residuais como ativadores.

4.3 Tempo de pega

O aglomerante ativado alcalinamente produzido apresentou tempo de início de pega de 51 minutos e tempo de fim de pega de 10 horas. O tempo inicial encontra-se dentro da faixa usualmente reportada para sistemas à base de metacaulim ativados com hidróxido de sódio, que varia tipicamente entre 30 e 90 minutos, dependendo da concentração alcalina, temperatura e relação Si/Al do sistema.

O tempo de fim de pega observado (10 horas) pode estar associado à elevada razão molar ($\text{SiO}_2/\text{NaOH} = 6,41$), a qual implica menor disponibilidade relativa de íons OH^- para promover a dissolução do precursor aluminossilicato. Essa condição tende a retardar a formação da rede tridimensional do gel N-A-S-H, prolongando o desenvolvimento da rigidez estrutural. Comportamentos semelhantes, caracterizados por tempos de pega mais elevados em sistemas com menor teor alcalino, foram reportados por Provis (2014) e Provis & van Deventer (2014), evidenciando a sensibilidade desses materiais à dosagem do ativador.

Assim, os resultados indicam cinética de endurecimento compatível com sistemas ativados por soluções alcalinas de baixa concentração, apresentando tempo inicial adequado para moldagem e tempo final coerente com a progressiva estruturação da matriz aluminossilicática.

4.4 Resistência à compressão do AAA

A razão molar considerada mostrou-se suficiente para promover a reação de ativação alcalina, embora com desenvolvimento mecânico moderado, resultando em resistência média à compressão média de 1,81 MPa aos 28 dias (Tab.2).

Tabela 2 - Resultados de resistência à compressão do aglomerante.

Amostra	Resistência à compressão (Mpa)	Resistência à compressão (Mpa)	Desvio padrão
1	1,85		
2	2,19	1,81	0,39
3	1,41		

Fonte: Autores (2026).

Os resultados evidenciam a viabilidade técnica preliminar do reaproveitamento da solução alcalina residual no próprio sistema ligante, contribuindo para a redução do descarte de efluentes e para a ampliação do ciclo de uso dos insumos, em consonância com os princípios da economia circular aplicados à construção civil. O desvio padrão observado (0,39 MPa) indica dispersão moderada dos resultados em torno da média.

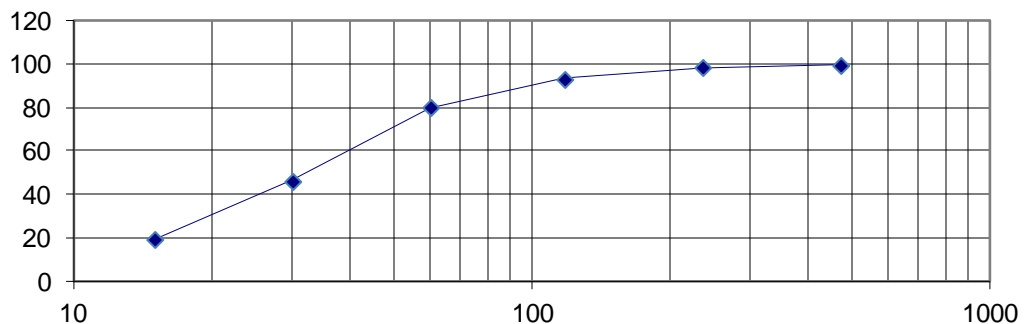
A baixa resistência mecânica pode ser atribuída à limitada alcalinidade da solução residual de NaOH, com concentração estimada de 10%, o que pode ter restringido a dissolução dos precursores aluminossilicatados e, conseqüentemente, a formação de uma matriz mais densa. Essa condição está associada à formação parcial do gel N-A-S-H, resultando em uma microestrutura menos compacta, conforme reportado para sistemas ativados com baixa concentração alcalina (Provis & van Deventer, 2014; Bernal, 2016).

Apesar do desempenho mecânico reduzido, os valores obtidos são compatíveis com aplicações não estruturais, tais como elementos de vedação, artefatos leves e camadas de regularização, conforme observado em estudos com aglomerantes álcali-ativados de baixa resistência (Bernal, 2016). Dessa forma, o aglomerante foi considerado tecnicamente viável para aplicação em argamassas, permitindo a continuidade da investigação experimental.

4.5 Caracterização da areia

A análise granulométrica da areia evidenciou uma distribuição contínua, compatível com agregado miúdo de granulometria média, sem descontinuidades acentuadas na curva, o que indica adequada capacidade de empacotamento e potencial de coesão na mistura. A Figura 3 apresenta a curva granulométrica da areia utilizada, evidenciando a distribuição contínua das partículas ao longo das faixas granulométricas analisadas.

Figura 3 - Curva granulométrica da areia.



Fonte: Autores (2026).

O índice de materiais pulverulentos apresentou valores de 3,04% e 3,43% para as amostras 1 e 2, respectivamente, situando-se dentro dos limites recomendados pela ABNT NBR 7211:2022 para agregados utilizados na produção de argamassas e concretos. Esses resultados indicam baixo teor de partículas finas indesejáveis (passantes na peneira de 0,075 mm), o que tende a reduzir a demanda de água e favorecer a aderência entre a pasta e o agregado.

A massa específica determinada ($2,58 \text{ kg/dm}^3$) encontra-se dentro da faixa típica para agregados quartzosos naturais, corroborando a adequação do material para aplicação em matrizes cimentícias e sistemas álcali-ativados. De forma geral, as características obtidas indicam que o agregado utilizado apresenta condições favoráveis para o desenvolvimento de argamassas com adequada estabilidade volumétrica e desempenho mecânico em aplicações não estruturais.

Esse comportamento é consistente com estudos que destacam a influência da granulometria e do teor de finos na trabalhabilidade e no desempenho mecânico de argamassas, especialmente em sistemas cimentícios e álcali-ativados, nos quais a interação entre matriz e agregado é determinante para a formação da microestrutura (Scrivener *et al.*, 2018).

4.6 Consistência da argamassa

Os resultados de consistência da argamassa apresentaram espalhamento variando entre 140 mm (Tipo 1) e 164 mm (Tipo 2), determinado em mesa de espalhamento conforme a EN 1015-3:1999. Essa faixa caracteriza comportamento de consistência média, indicando adequada capacidade de deformação sob a energia padronizada do ensaio.

O menor valor de espalhamento (140 mm) está associado a mistura mais coesa e potencialmente mais estável quanto à exsudação e segregação. Por outro lado, o maior espalhamento (164 mm) indica maior mobilidade da pasta, possivelmente relacionada à ausência de material celulósico na argamassa Tipo 2, o que pode ter reduzido a absorção de água e aumentando a fluidez do sistema. Adicionalmente, a presença de partículas finas, como metacaulim e sílica ativa, pode ter contribuído para a dispersão da matriz e influenciado o comportamento reológico da mistura.

De modo geral, os resultados indicam trabalhabilidade compatível com aplicações moldadas e adensadas manualmente, sem indícios visuais de segregação, evidenciando equilíbrio entre fluidez e coesão da matriz. Esse comportamento é consistente com estudos que destacam a influência da fração fina e da retenção de água na consistência de argamassas, especialmente em sistemas cimentícios e álcali-ativados (Scrivener *et al.*, 2018).

4.7 Resistência à compressão da argamassa aos 60 dias

A densidade aparente no estado fresco variou entre 1,06 g/cm³ (Tipo 1) e 1,67 g/cm³ (Tipo 2), evidenciando a influência significativa da incorporação do material celulósico proveniente dos sacos de cimento processados. Valores mais baixos de densidade indicam maior porosidade inicial e maior retenção de vazios, enquanto valores mais elevados sugerem melhor acomodação granular e menor volume de ar aprisionado.

Observa-se uma tendência de correlação entre maiores densidades no estado fresco e maiores resistências mecânicas, indicando que misturas com melhor compactação e menor teor de vazios resultam em matrizes mais coesas e resistentes. Essa relação refletiu diretamente no desempenho mecânico aos 60 dias, com resistência à compressão variando entre 0,81 MPa (Tipo 1) e 1,46 MPa (Tipo 2) (Tab. 3).

Tabela 3 - Resultados de resistência à compressão das argamassas.

Tipo	Amostra	Resistência à compressão (Mpa)	Média (Mpa)	Desvio padrão
1	1	0,76	0,81	0,04
1	2	0,84		
1	3	0,83		
2	1	1,54	1,46	0,14
2	2	1,29		
2	3	1,54		

Fonte: Autores (2026).

Os resultados indicam que a incorporação do resíduo proveniente dos sacos de cimento, na proporção de 5%, promoveu redução da resistência à compressão, possivelmente em função do aumento da porosidade e da menor densificação da matriz. Esse comportamento é consistente com estudos que apontam que a introdução de materiais fibrosos ou de baixa rigidez pode comprometer o desempenho mecânico, ao mesmo tempo em que pode contribuir para outras propriedades, como redução de densidade e melhoria do desempenho térmico (Scrivener *et al.*, 2018).

Apesar da redução observada, os valores obtidos são compatíveis com aplicações não estruturais, como elementos de vedação, enchimentos leves e componentes com função térmica, especialmente considerando a natureza alternativa dos precursores e da solução alcalina empregada.

Dessa forma, recomenda-se que, em estudos futuros, sejam avaliadas proporções inferiores a 5% de incorporação do resíduo, visando otimizar o equilíbrio entre desempenho mecânico e benefícios funcionais, como leveza e isolamento térmico. Esses resultados evidenciam o potencial de aplicação do sistema proposto em materiais de baixa exigência estrutural, reforçando a viabilidade do reaproveitamento integrado de resíduos no contexto da economia circular.

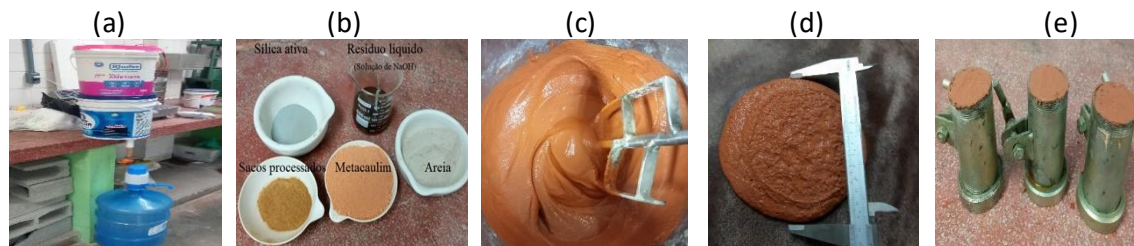
4.8 Considerações finais sobre o estudo

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade do reaproveitamento integrado dos resíduos gerados no processo de tratamento dos sacos de cimento, contemplando tanto a fração líquida quanto a sólida. Observou-se o consumo total da solução alcalina ao longo do sistema, com rendimento de 0,084 L por saco de cimento processado, além de consumo energético de aproximadamente 0,36 kWh por ciclo, correspondente a uma eficiência de 0,012 kWh por saco. Destaca-se que esse consumo pode ser associado a fontes de energia renovável, ampliando o potencial ambiental da proposta.

O método proposto contribui para a mitigação dos impactos associados à disposição inadequada de sacos de cimento Portland, estando alinhado com estratégias de sustentabilidade e economia circular, conforme diretrizes apontadas por organismos internacionais (UNEP, 2024). Além disso, os resultados reforçam a viabilidade do tratamento de sacos de cimento previamente investigado por Soares *et al.* (2024b), ampliando sua aplicação por meio da incorporação do resíduo líquido na produção de aglomerantes álcali-ativados.

Do ponto de vista técnico, o protótipo desenvolvido, bem como os materiais obtidos, aglomerante e argamassa, apresentaram condições operacionais compatíveis com processos controláveis e potencialmente escaláveis, indicando viabilidade de aplicação em contextos produtivos. A Figura 4 ilustra o sistema proposto e suas etapas de aplicação, enquanto a Tabela 4 apresenta a comparação dos resultados obtidos com estudos de referência.

Figura 4 - Protótipo (a), componentes para argamassa (b), mistura (c) e controle tecnológico (d,e).



Fonte: Autores (2026).

Tabela 4 - Comparação deste estudo com resultados de referências.

Autor	Precursor Sistema	/ Ativador	Razão molar	Resistência compressão	à Idade (dias)
Este estudo	Metacaulim + sílica ativa	NaOH residual (~10%)	6,41	1,81 MPa / 1,46 MPa	28–60
Al-Azzawi <i>et al.</i> (2022)	Metacaulim	NaOH (baixa molaridade)	~3,2	2,5 – 4,8 MPa	28
Bernal (2016)	Metacaulim	NaOH diluído	>4	1–10 MPa	28
Zhang <i>et al.</i> (2023)	Metacaulim	Ativador à base de Carbonato	2,5 – 3,0	12 – 18 MPa	28
Provis (2014)	Metacaulim	NaOH	~3–4	5–25 MPa	28
Provis & van Deventer (2014)	Metacaulim	NaOH+ silicato	2–4	20–50 MPa	28
Bernal (2016)	Metacaulim / escória	NaOH+ silicato	2–3,5	30–60 MPa	28
Scrivener <i>et al.</i> (2018)	Sistemas cimentícios	Variado	—	10–80 MPa	28

Fonte: Adaptado de Provis & van Deventer (2014), Provis (2014), Bernal (2016), Scrivener *et al.* (2018), Al-Azzawi *et al.* (2022) e Zhang *et al.* (2023).

A comparação com a literatura evidencia que, embora os valores de resistência mecânica sejam inferiores aos sistemas convencionais de maior desempenho, os resultados obtidos encontram-se dentro da faixa reportada para sistemas ativados com baixa concentração alcalina, reforçando a coerência dos dados experimentais e a consistência da abordagem adotada.

Apesar dos avanços observados, o desenvolvimento de tecnologias associadas a sistemas de baixo carbono ainda enfrenta desafios, especialmente no que se refere à otimização de desempenho e à viabilidade em larga escala (Lichtenberger *et al.*, 2022). Nesse sentido, estudos futuros devem buscar o aprimoramento das condições de ativação, ajuste da razão molar e avaliação de novas aplicações, incluindo o uso in loco do aglomerante desenvolvido.

5. CONCLUSÃO

O estudo demonstrou a viabilidade técnica do desenvolvimento de um protótipo para o processamento de sacos de cimento contaminados, com ênfase no aproveitamento integrado dos resíduos gerados. O sistema proposto possibilitou a obtenção de material sólido de baixa granulometria com potencial de reuso, bem como o reaproveitamento da solução alcalina residual na produção de aglomerante ativado alcalinamente.

Os resultados indicaram, ainda, potencial de redução do consumo de cimento Portland em aplicações não estruturais, contribuindo para estratégias de economia circular na construção civil. Apesar das limitações mecânicas observadas, com resistência à compressão de até 1,46 MPa na argamassa, o material apresentou desempenho compatível com aplicações de baixa exigência estrutural.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a otimização dos parâmetros de formulação, especialmente a razão molar e o teor de sólidos, visando o aprimoramento do desempenho mecânico. Adicionalmente, sugere-se a realização de ensaios complementares, como resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e absorção de água por capilaridade, para uma caracterização mais abrangente do material.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro fornecido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (Edital nº 41/2017 - CAPES/PRINT – Processo: 88887.682519/2022-00) e o apoio técnico oferecido pelo Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa – Portugal.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

AL-AZZAWI, M. *et al.* Mechanical and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer with low molarity sodium hydroxide solution. **Journal of Building Engineering**, v. 45, p. 103549, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.02.002>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16541:2016. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16607:2018. Cimento Portland — determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054:2022. Cimento Portland e outros materiais em pó — determinação da área específica pelo método de Blaine. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738:2015. Concreto — procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211:2022. Agregados para concreto — especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248. Agregados — determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT.

BERNAL, Susan A. Durability of alkali-activated materials: progress and perspectives. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 99, n. 3, p. 1–19, 2016.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1015-3:1999. Methods of test for mortar for masonry — Part 3: determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Brussels: CEN, 1999.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1015-11:2019. Methods of test for mortar for masonry — Part 11: determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels: CEN, 2019.

GERALDO, Rodrigo H.; GONÇALVES, Jardel P.; CAMARINI, Gladis. Durability of one-part alkali-activated binder made with alternative sodium silicate. **Construction Materials**, v. 6, p. 8, 2026.

Ji, Y.; PENG, Y.; STRAND, A.; FU, S.; SUNDBERG, A.; RETULAINEN, E. Fiber evolution during alkaline treatment and its impact on handsheet properties. **BioResources**, v. 13, n. 4, p. 7310–7324, 2018.

LICHTENBERGER, A.; BRAGA, J. P.; SEMMLER, W. Green bonds for the transition to a low-carbon economy. **Econometrics**, v. 10, n. 1, p. 11, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/econometrics10010011>

MARQUES, M.; BENINI, S. M. Resíduos da construção civil e as contradições da sustentabilidade. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, [S. l.], v. 14, n. 91, p. e2534, 2026. DOI: 10.17271/23188472149120266236. DOI: <https://doi.org/10.17271/23188472149120266236>

PROVIS, John L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? **Materials and Structures**, v. 47, p. 11–25, 2014.

PROVIS, John L.; VAN DEVENTER, Jannie S. J. (ed.). **Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report**. Dordrecht: Springer, 2014.

SCRIVENER, Karen L.; JOHN, Vanderley M.; GARTNER, Ellis 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.

SOARES, R. C. *et al.* Método de tratamento para sacos de cimento e provável reuso: estudo com argamassa. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, [S. l.], v. 12, n. 87, 2024. DOI: 10.17271/23188472128720245134. DOI: <https://doi.org/10.17271/23188472128720245134>

SOARES, R. C.; SOUSA, A. N. E. Reuso de sacos de cimento Portland como isolante termoacústico. In: CERIS. (Org.). **Livro de atas do 5º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis**. Lisboa: CERIS, 2024. p. 2619–2630.

SOARES, R. C.; VIEIRA, L.; BELLEI, P. Low carbon in the reuse of Portland cement bags: a ten-year review. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 23, n. 4, p. 891–901, 2024. DOI: <https://doi.org/10.30638/eemj.2024.069>

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP); GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION. **Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025**. Nairobi: UNEP, 2024. Disponível em: <https://globalabc.org/>. Acesso em: 25 fev. 2026.

VILLAR, J. C. *et al.* The effect of alkaline pre-treatment on cellulose pulp fiber dissolution. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 11, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2025.100978>

ZHANG, S. *et al.* Properties of metakaolin-based geopolymers activated by sodium carbonate and sodium silicate. **Ceramics International**, [s. l.], v. 49, n. 4, p. 6241–6255, 2023.

ZHANG, X. *et al.* How could we benefit from a low-carbon economy? Evidence from Chinese regional labor markets. **Structural Change and Economic Dynamics**, v. 71, p. 523–537, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2024.09.001>

DECLARAÇÕES

CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

- **Concepção e Design do Estudo:** Ricardo Soares, Rosana Fialho e Jardel Gonçalves.
- **Curadoria de Dados:** Ricardo Soares, Rosana Fialho e Jardel Gonçalves.
- **Análise Formal:** Sheyla Karolina
- **Aquisição de Financiamento:** Ricardo Soares e Rosana Fialho.
- **Investigação:** Ricardo Soares.
- **Metodologia:** Ricardo Soares, Rosana Fialho e Jardel Gonçalves.
- **Redação - Rascunho Inicial:** Ricardo Soares.
- **Redação - Revisão Crítica:** Rosana Fialho, Jardel Gonçalves e Sheyla Karolina.
- **Revisão e Edição Final:** Ronny Souza e Sheyla Karolina.
- **Supervisão:** Rosana Fialho e Jardel Gonçalves

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, Ricardo Soares, Rosana Fialho, Jardel Gonçalves, Sheyla Karolina e Ronny Souza, declaramos que o manuscrito intitulado "**Desenvolvimento de protótipo para reciclagem de embalagens de cimento: do resíduo sólido ao aglomerante álcali-ativado**":

1. **Vínculos Financeiros:** Não possui vínculos financeiros que possam influenciar os resultados ou interpretação do trabalho.
2. **Relações Profissionais:** Não possui/possui relações profissionais que possam impactar na análise, interpretação ou apresentação dos resultados.
3. **Conflitos Pessoais:** Não possui conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito.