

Efeito combinado de fibras naturais e resíduos pozolânicos no desenvolvimento de compósitos cimentícios sustentáveis: uma revisão de literatura

Elaine Ferreira dos Santos Fernandes ¹, Érica Karine Alves de Lima ², Ketelly Estefane da Silva Alves ³, Hitalo de Jesus Bezerra da Silva ², Valdeci Bosco dos Santos ^{1*}

¹ Departamento de Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Piauí, 64049-550, Teresina, Piauí, Brasil

² Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais, Universidade Federal de Pernambuco, 50740-560, Recife, Pernambuco, Brasil

³ Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Maranhão, 65915-240, Imperatriz, Maranhão, Brasil

*e-mail: valdecisantos@ufpi.edu.br

Resumo

O reaproveitamento de resíduos e a minimização do consumo de recursos naturais podem ser soluções viáveis para reduzir os impactos ambientais e de custos na indústria da construção civil. Assim, fibras naturais de juta, sisal, coco, entre outras, têm sido adicionadas em compósitos cimentícios como reforço mecânico. Já os resíduos industriais (cinzas volantes, resíduo vítreo) e agroindustriais (cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana-de-açúcar, entre outras) são atrativos por oferecerem atividade pozolânica, substituindo parcialmente o cimento. Diante disso, este estudo teve por objetivo analisar as características físico-químicas destes materiais alternativos e suas aplicações combinadas na produção sustentável de compósitos cimentícios, por meio de uma revisão da literatura. O levantamento dos artigos foi realizado nas bases de dados Scopus, Web of Science, Science Direct e SciELO, publicados entre 2020 e 2024, utilizando descritores específicos. Os resultados revelaram que a incorporação de até 1% de fibras naturais e até 20% de resíduos industriais e agroindustriais contribui para melhorias significativas nas propriedades mecânicas, como resistência à compressão, tração, flexão e à fissuração, além de promover a redução da absorção de água e da permeabilidade à água, bem como a elevação da durabilidade. Conclui-se que a associação entre fibras e resíduos representa uma solução promissora para o setor da construção, embora ainda existam outros fatores a serem explorados, como estudos sobre variação de temperatura, ação química e biológica, além de resistência ao fogo e escalabilidade industrial. Por fim, diante dos achados, espera-se que esta revisão incentive o maior uso e valorização de insumos renováveis e resíduos sólidos, bem como estimule mais pesquisadores e a indústria da construção a desenvolver materiais sustentáveis, contribuindo para a literatura científica especializada à luz dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Palavras-chave: compósitos cimentícios; indústria de construção; propriedades de engenharia; recursos renováveis.

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil, reconhecida por seu alto impacto econômico e ambiental, tem enfrentado grandes desafios para tornar suas operações em processos mais sustentáveis, os quais minimizem os danos ao meio ambiente e adotem modelos de produção mais ecológicos de modo premente [1–3]. Assim, a busca por novas formulações tem se mostrado uma estratégia promissora para otimizar o uso do cimento, reduzindo sua demanda sem comprometer o desempenho estrutural [4],

contribuindo para uma menor extração de recursos naturais não renováveis. Nesse contexto, diversos estudos têm sido desenvolvidos com o intuito de substituir parcialmente os materiais cimentícios por soluções ecologicamente e economicamente viáveis [5].

Considerando os impactos de ordem ambiental decorrentes da produção do cimento, a incorporação de matérias-primas alternativas nos produtos construtivos contribui para minimizar as emissões de (CO₂) e a exploração dos recursos naturais, além de promover a sua reutilização, atenuando os danos associados ao seu eventual descarte inadequado [6]. Por outro lado, em relação ao aspecto econômico, métodos como esse podem reduzir os custos de produção na construção civil, uma vez que muitos desses materiais são subprodutos de baixo custo ou sem valor comercial, amplamente disponíveis e economicamente viáveis [7].

Entre essas alternativas, destacam-se as fibras naturais como sisal [8], coco [9], cânhamo [10], eucalipto [11], linho [12], bananeira [13], e outras espécies, as quais são matérias-primas de fontes renováveis e têm sido utilizadas como uma alternativa praticável para o desenvolvimento de compósitos cimentícios reforçados sustentáveis. Estes materiais são capazes de melhorar as propriedades mecânicas de matrizes cimentícias, aumentando sua resistência, ductilidade, elasticidade, durabilidade, por exemplo [14]. Além disso, as fibras naturais apresentam uma ampla disponibilidade, baixa densidade, baixo custo e renovabilidade [5]. Características inerentes às fibras naturais como sua origem, composição química e dimensão, assim como o uso da dosagem adequada, são fatores essenciais para a obtenção de compósitos com propriedades mecânicas aprimoradas [15-17].

Paralelamente, o uso de materiais cimentícios suplementares como substituto parcial ou em adição ao cimento viabiliza o reuso de resíduos industriais (cinzas volantes, escória de alto-forno, sílica ativa, resíduo vítreo etc.) e agroindustriais (cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana-de-açúcar, cinza de casca de café, cinza de palha de milho e trigo, entre outras) [18-21], constituindo-se também como uma abordagem eficiente para construção ecologicamente correta. Estes resíduos pozolânicos geralmente contêm elementos silicosos amorfos e aluminosos suficientes, isto é, em quantidade adequada, que contribuem significativamente para a reação com o hidróxido de cálcio em presença de umidade, formando o gel de silicatos de cálcio hidratados cimentícios, substâncias essenciais que beneficiam a resistência mecânica e a durabilidade dos compósitos cimentícios [22-26].

Tecnicamente, o desempenho sinérgico entre fibras naturais e resíduos pozolânicos contribui para o aperfeiçoamento das características mecânicas e durabilidade dos compósitos cimentícios [27-32]. Essa estratégia mútua resulta em materiais ainda mais eficientes e economicamente vantajosos em direção ao desenvolvimento sustentável para a indústria da construção [33-35]. No entanto, apesar das vantagens evidentes dessa associação, ainda são escassos os estudos na literatura que investigam o uso conjunto dessas duas classes de materiais.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi realizar uma revisão da literatura sobre o uso combinado de fibras naturais e resíduos industriais ou agroindustriais como materiais alternativos para a produção de compósitos cimentícios, com vistas à substituição parcial do cimento. Além disso, avaliou-se as características físico-químicas desses materiais e o desempenho físico e mecânico dos compósitos formados.

2. MÉTODOS

Na presente revisão foram considerados apenas artigos de pesquisa. A busca foi realizada nas bases Scopus, Web of Science, Science Direct e SciELO, utilizando três combinações principais de palavras-chave: "natural fiber" and pozzolanic and cement; "natural fiber" and pozzolan* and cement; e "natural fiber" and pozzolan* and construction. Em cada base, os campos de busca foram restringidos a título, resumo e palavras-chave, conforme as funcionalidades oferecidas por cada plataforma, considerando publicações no período entre 2020 e 2024. O levantamento dos artigos foi realizado em dezembro de 2024.

Ao todo, foram identificados 69 artigos, dos quais 42 foram excluídos por duplicidade. Os 27 artigos restantes foram lidos na íntegra, e, após análise, 17 foram excluídos por não atenderem aos critérios de elegibilidade. Foram considerados elegíveis os estudos que apresentavam análise experimental envolvendo fibras naturais combinadas com materiais pozolânicos. Como resultado, 10 artigos foram selecionados para compor esta revisão (Fig.1).

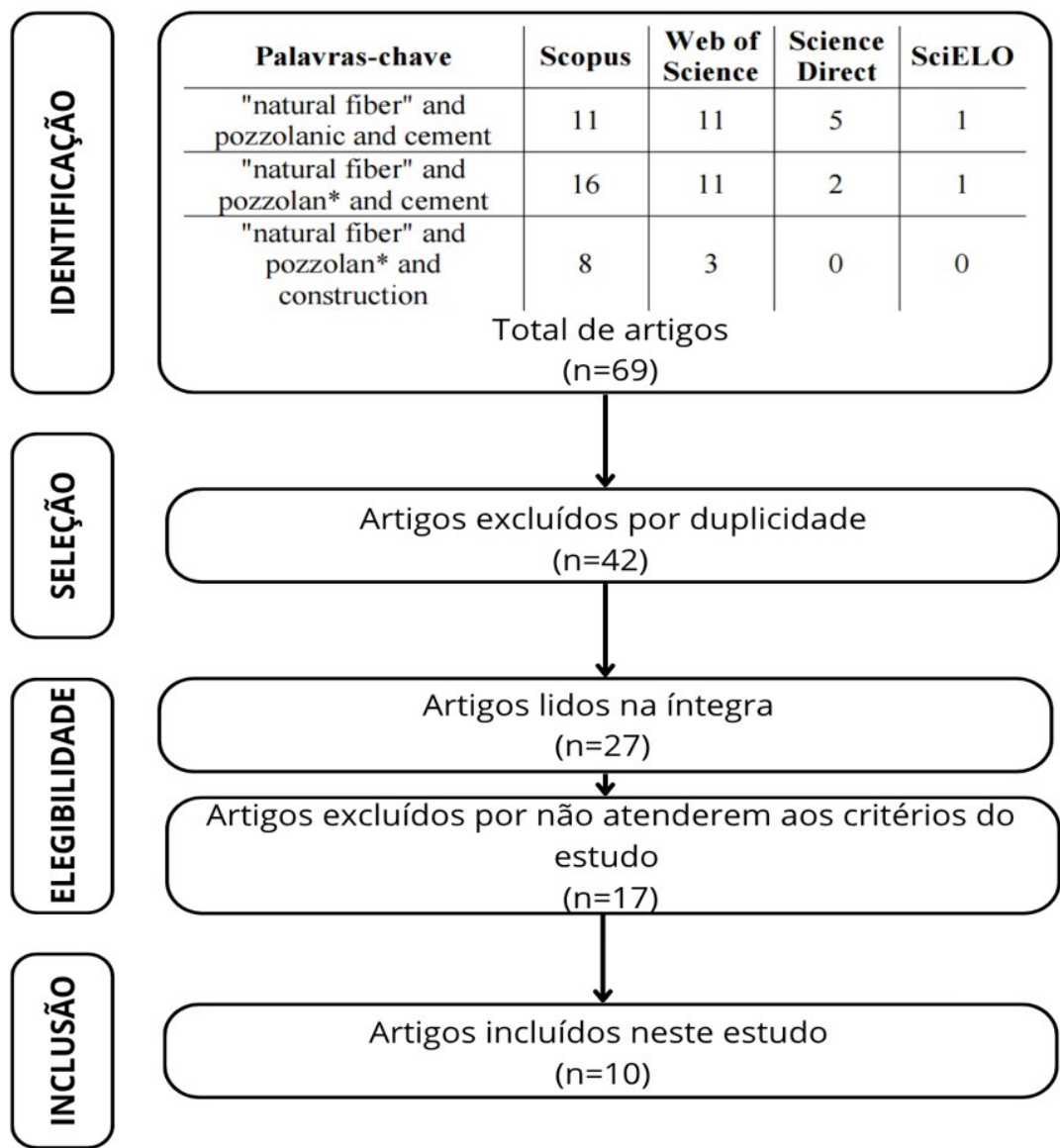


Figura 1. Processo de seleção dos artigos incluídos na revisão. O símbolo (*) foi utilizado nas buscas para assegurar que as derivações do radical da palavra também fossem captadas pelas bases de dados.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 A indústria da construção civil

A indústria da construção abrange a execução de uma variedade de obras, como a construção de prédios, residências, instalações industriais e infraestruturas, tanto urbanas quanto rurais. Em constante desenvolvimento, essa indústria adapta-se ao crescimento da sociedade, às mudanças nos hábitos de vida e à introdução de novas tecnologias, o que permite que ela se torne mais eficiente, segura e capaz de atender às necessidades socioeconômicas [36].

No Brasil, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2024, o Produto Interno Bruto (PIB) da construção civil cresceu 4,1% em relação ao trimestre do ano anterior, devido ao aumento de 3,7% na atividade de valor agregado. Assim, a indústria da construção desempenha um papel fundamental na economia do país, gerando uma grande quantidade de empregos para a população [37,38]. A exemplo, o mercado de trabalho deste setor, em 2024, registrou a criação de 230 mil novos empregos formais [39].

No entanto, a construção civil enfrenta desafios por ser um setor associado à degradação do solo, flora e da fauna, à poluição ambiental, à geração excessiva de resíduos sólidos e ao alto consumo de energia e água [40]. Diante desses impactos ambientais e considerando também aspectos sociais e econômicos, a Organização das Nações Unidas (ONU) declarou 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) a serem implementados até 2030 [41]. Do ponto de vista ambiental, 3 ODS (Figura 2) estão relacionadas com a temática em discussão: construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação (ODS 9), tornar as cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis (ODS 11), e garantir padrões de consumo e de produção responsável, incluindo o uso eficiente de recursos naturais (ODS 12) (Fig.2).



Figura 2. Metas globais com eixo ambiental dos ODS [41]

Nesse contexto, a busca por alternativas sustentáveis na indústria da construção tornou-se uma prioridade global. Gestão eficiente de resíduos, consumo reduzido de energia na manutenção e reformas, aproveitamento de recursos naturais (iluminação e ventilação natural) que proporcionam conforto térmico e acústico, são algumas das diversas características relacionadas a uma construção verde [42,43].

Outra prática sustentável inclui o reaproveitamento e a reciclagem de materiais renováveis, resíduos sólidos provenientes de indústrias e agroindústrias pela construção civil. Essa abordagem não só ajuda a reduzir a intensa exploração de recursos naturais, mas também beneficia as empresas geradoras destes resíduos de forma estratégica, resultando em menores custos logísticos relacionados a sua destinação final.

Ao incorporar essas matérias-primas alternativas, como fibras naturais, cinzas de biomassa, vidro, resíduos da construção e demolição e outros, é possível produzir concretos, argamassas, tijolos e telhados. Assim, são desenvolvidos produtos sustentáveis e economicamente viáveis, com valor agregado, além de contribuir para a economia circular e a preservação ambiental [26,44–46].

3.2 Fibra natural

Com base no conceito de sustentabilidade, a utilização de fibras naturais derivadas de plantas, como possibilidade de reforço mecânico em produtos construtivos (argamassa, concreto, tijolos, painéis, dentre outros) à base de cimento, tem despertado excepcional interesse [47–49]. São matérias-primas naturais que oferecem vantagens como natureza renovável e ecológica, biodegradabilidade, não emitem CO₂, amplamente disponíveis, facilidade de uso, alto desempenho mecânico, térmico e acústico, baixa densidade e custo-benefício [50–52].

Fibras naturais como curauá [16], bambu [49], sisal [50], abacá [53], juta [54], cânhamo [55], linho [55], banana [56], coco [57] têm sido frequentemente usadas nos mais diversos materiais de construção. O desempenho físico e mecânico de cada fibra natural é fortemente influenciado tanto pelas circunstâncias de crescimento e sua origem, quanto por sua composição química, densidade, diâmetro, comprimento, formato e microestrutura, dentre outros fatores [58,59]. Algumas propriedades físico-químicas e mecânicas das fibras naturais são apresentadas na Tab.1. A compreensão acerca dessas propriedades pode ser útil na tomada de decisão sobre a escolha do tipo de fibra, considerando o material construtivo final.

Tabela 1. Características físico-químicas e mecânicas das fibras naturais [48,60,61].

Fibras	Composição química (%)			Densidade (g/cm ³)	Propriedades mecânicas	
	Celulose	Hemicelulose	Lignina		Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Cânhamo	57 – 77	3,70 – 13	14 – 22,40	1,40 – 1,50	310 – 900	17 – 70
Coco	32 – 43	40 – 45	0,15 – 0,25	1,15 – 1,50	105 – 220	4 – 6
Sisal	47 – 78	7 – 11	10 – 24	1,20 – 1,50	80 – 855	9 – 38
Juta	45 – 71,60	21 – 26	13,60 – 21	1,35 – 1,46	200 – 800	10 – 55
Banana	60 – 65	5 – 10	19	1,30 – 1,35	350 – 910	8 – 33
Bambu	26 – 73,83	10,15 – 36,88	12,49 – 31	0,60 – 1,10	140 – 230	10 – 30

As fibras naturais têm como composição principal a celulose (parte cristalina), hemicelulose e lignina (elementos amorfos), além de outros constituintes (graxas e impurezas, por exemplo) em menor teor. Cada um dos principais constituintes das fibras naturais contribui diretamente para o aumento ou diminuição das propriedades mecânicas e adesão da fibra com a matriz cimentícia, a depender das porcentagens presentes [60,61]. A presença de grupos OH na estrutura química das fibras naturais estabelece seu caráter hidrofílico, resultando em alta absorção de umidade que pode ser incompatível para a boa ligação com a matriz cimentícia [47,51,53,55].

A hidrofiliabilidade natural da fibra pode ser aprimorada por meio de métodos físicos (alongamento, exposição à radiação ultravioleta e tratamento térmico) ou químicos (tratamento alcalino, silanização, acetilação, dentre outros), os quais promovem a sua modificação superficial (redução dos grupos OH, ceras, impurezas), aumento da rugosidade e da adesão mecânica entre fibra natural e cimento, ajustando significativamente as propriedades mecânicas [62,63]. Consequentemente, essas técnicas tendem a propiciar propriedades mecânicas superiores em comparação aos compósitos com fibras naturais não modificadas [47,64].

Além das características citadas, a proporção de fibra adicionada influenciará significativamente nas propriedades finais das matrizes cimentícias. Baixos teores de fibras diminuem a permeabilidade e aumentam a compactação da massa, contribuindo também para uma melhor adesão ao cimento. Por outro lado, altos teores de fibras podem resultar em má dispersão, aumentando o volume de poros dentro do compósito cimentício [65,66].

De forma geral, a adição de fibras naturais tem viabilizado à matriz cimentícia propriedades satisfatórias, tais como leveza, maior resistência à compressão, à flexão, à tração e ao impacto, resistência à fissuração e à fadiga, e maior tenacidade, permitindo a produção de materiais com desempenho igual ou superior aos produtos convencionais e a um custo de fabricação relativamente baixo [49,50,53–56,62,67].

3.3. Resíduos pozolânicos

Os materiais cimentícios suplementares são essenciais para o setor de engenharia civil. Eles são considerados pozolânicos e, por terem semelhança com o cimento, podem substituí-lo parcialmente em diferentes aplicações, como concreto, pasta de cimento, argamassa, geopolímeros e tijolos [26,68]. Esses materiais ainda contribuem para a adição de resistência mecânica e aumento das propriedades de durabilidade dessas aplicações, assim como para a redução da demanda pelo uso de cimento [25].

Diversos resíduos industriais (cinzas volantes, escória de alto-forno, sílica ativa, pó de vidro, pó de tijolo de argila etc.) e agroindustriais (cinzas de casca de arroz, cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, cinzas de palha de teff, entre outros) [10,68,69], têm sido investigados como agentes pozolânicos efetivos, podendo ser utilizados como substitutos parciais do cimento. A sua reciclagem resulta em materiais de construção úteis e ambientalmente amigáveis, além de poder contribuir para a redução no custo final dos produtos fabricados.

Materiais pozolânicos são compostos, principalmente, por matérias-primas sílico-aluminosas que possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, e que reagem com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, desenvolvendo característica cimentante, e contribuindo efetivamente para a resistência mecânica dos produtos [70,71]. O seu grau de reatividade está fortemente relacionado à quantidade de sílica amorfa e alumina na composição do material pozolânico, além da área de superfície específica e distribuição do tamanho das partículas [26,72,73].

A variabilidade na composição química (Tab.2) depende da origem de cada resíduo pozolânico, os quais têm características e composições diferentes. Além de quantidades consideráveis de SiO_2 e Al_2O_3 , estes resíduos também apresentam outros óxidos em pequenos teores, que também contribuem para promover as reações de hidratação de cimento ou propriedades finais. Por exemplo, o CaO influencia os processos de reação pozolânica C-S-H (silicato de cálcio hidratado), facilitando a cinética da reação e endurecimento da pasta para o aumento da resistência, quando em quantidade adequada, para não favorecer expansão tardia no compósito [74]. A presença de SO_3 , por sua vez, pode intervir no tempo de pega e, conseqüentemente, na trabalhabilidade da matriz cimentícia [74,75]. Compostos como Na_2O atuam na formação do gel expansivo deletério que compromete a integridade do compósito cimentício, em virtude da reação álcali-sílica (RAS) [76]. Em relação à perda ao fogo do material, um valor elevado simboliza um alto teor de carbono no compósito, o qual prejudica a durabilidade do compósito final [68,74].

Tabela 2. Composição química (% massa) dos resíduos pozolânicos.

Materiais Pozolânicos	Composição (%)										Ref.
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	MgO	CaO	SO_3	Outros	PF ^d	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	
Cinzas volantes e escória de alto-forno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	[77]
Escória de alto-forno	40,10	6,00	2,00	1,20	4,70	-	0,15	2,60 ^a	-	48,10	[78,79]
Cinzas volantes	48,57	32,32	4,01	-	0,93	6,00	1,33	-	2,46	84,90	[80]
Rejeitos de minério de ferro	79,60	0,20	-	-	-	-	-	13,64 ^b	0,43	79,80	[81]
Cinzas de bagaço de cana-de-açúcar	69,93	5,27	5,38	5,64	-	6,20	0,59	1,63 ^c	5,36	80,58	[82]
Sílica ativa	90,32	-	2,32	2,15	-	1,12	0,27	0,23 ^a	3,59	92,64	
Pó de vidro	69,70	2,07	0,25	12,90	3,11	8,30	-	1,86	1,81	72,02	[83]
Pó de vidro	71,60	1,06	-	12,41	4,10	9,86	-	-	-	72,66	[84]
Pó de resíduo cerâmico	63,52	19,60	8,66	4,04	1,82	1,52	0,76	-	2,1	91,78	[85]
Sílica ativa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	[86]

^a MnO; ^b Fe e P; ^c P2O5; ^d PF: Perda ao fogo.

Segundo a NBR 12653 [71], os requisitos para um material ser considerado como pozolânico é o somatório de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$, atendendo às pozzolanas naturais (classe N) e às cinzas volantes (classe C). A combinação destes elementos em percentuais maiores do que 50% referem-se à classe E, representada pelas escórias de alto-forno ou aqueles materiais que não se encaixam nas outras categorias [68], mas obedecem ao requisito da norma. Como exemplo aos materiais pozolânicos da Tab.2, onde é visto valores superiores ao solicitado pela NBR 12653 [71], considerando que estejam enquadrados como classe E. Uma exceção está relacionada à pesquisa relatada por Yahiaoui e seus colaboradores (2022) [79], que utilizou a escória de alto-forno (Classe E) com $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$

igual a 48,10%. Entretanto, os autores não relataram quaisquer desvantagens em relação a esse aspecto, uma vez que o produto final demonstrou resultado satisfatório para um compósito com 15% de substituição do cimento pela escória.

Por outro lado, considerando outros tipos de óxidos (independente da classe de pozzolanas), o recomendado por esta NBR 12653 [71], são as porcentagens de $\text{SO}_3 \leq 5\%$ e álcalis disponíveis em $\text{Na}_2\text{O} \leq 1,5\%$. Em relação à perda ao fogo, valores de até 6% são aceitáveis para a classe C e E, enquanto para classe N, $\text{PF} \leq 10\%$. Para SO_3 e a perda ao fogo (Tab.2) é visto que os valores apresentados estão em conformidade com a norma. Em relação ao teor de álcalis disponíveis em Na_2O , suas porcentagens foram contabilizadas conjuntamente com as do potássio da composição para a maioria dos trabalhos analisados.

No que concerne ao tamanho das partículas, a reação pozolânica muda consideravelmente, sendo mais eficiente na medida que se adotou partículas mais finas ($< 74 \mu\text{m}$) [68,87]. De forma geral, essa tendência decorre de uma área de superfície específica maior, que se integra mais facilmente com o meio cimentício, favorecendo nucleação dos cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de forma mais rápida, maior hidratação e melhor perda ao fogo [28,29,74]. Além da reatividade, partículas pozolânicas mais finas também podem atuar como agentes de preenchimento (efeito filler), os quais podem aumentar a densidade das matrizes cimentícias [88,89]. Portanto, partículas finas podem impactar o comportamento mecânico dos compósitos cimentícios.

Além das características químicas e físicas dos resíduos pozolânicos, o desempenho ideal dos materiais de construção também é dependente da proporção de substituição em relação ao cimento. Por exemplo, os teores recomendados compreendem a faixa de 10% a 20% destes resíduos [26,27,29,90,91], podendo expandir até o máximo de 30%, sem que haja prejuízo nas propriedades mecânicas [28,92]. Valores percentuais que excedem essas proporções refletem em má eficiência do compósito devido ao retardo do tempo de pega com consequente redução na taxa de hidratação e menor resistência à compressão em idades iniciais (~ 28 dias). Estes fatores são motivados pelo menor teor de Portlandita e redução do cimento ligada a uma reação pozolânica tardia dos rejeitos [26,29,69,91].

A substituição parcial do cimento Portland por resíduos pozolânicos (sílica ativa, cinza volante, escória de alto-forno, pó de vidro, e outros) também tem indicado um desempenho melhorado em relação à RAS, em virtude do consumo de álcalis e portlandita pela reação pozolânica, o que pode diminuir a quantidade de íons cálcio oriundos da solução dos poros [31,93]. O gel expansivo deletério geralmente começa a se desenvolver devido a três fatores: 1) excesso de alcalinidade no ambiente cimentício; 2) sistema cimentício com ambiente úmido; e 3) uso de agregados reativos aos álcalis [94]. O controle ou a inibição da RAS é altamente dependente da composição química (principalmente de sílica, cálcio e do álcali Na_2O), da dosagem adequada e do tamanho de partículas dos resíduos pozolânicos [30,31]. Por exemplo, ao utilizar partículas finas, há maior reação pozolânica e consumo dos reagentes disponíveis no meio cimentício [26,76,92,95,96]. Além disso, os vazios em estruturas cimentícias são preenchidos proporcionando um ambiente homogêneo livre de acúmulo de água [94], o qual contribui para elevação na resistência mecânica e durabilidade do compósito [96].

De maneira geral, o reuso de resíduos de forma sustentável beneficia a trabalhabilidade, permeabilidade, resistência ao ataque ácido, melhora a durabilidade, contribui para a estabilidade e aumento na resistência mecânica das matrizes cimentícias [26,69,72,97].

4. DISCUSSÃO

4.1 Aplicabilidade combinada de fibras naturais e resíduos pozolânicos na Construção Civil

Notavelmente, a aplicação de insumos alternativos em compósitos cimentícios contribui significativamente tanto para um ambiente sustentável quanto para o produto final. Dessa forma, segundo os resultados avaliados no levantamento, observa-se os efeitos sinérgicos entre matérias-primas renováveis como reforço mecânico e os resíduos industriais e agroindustriais com ação pozolânica no desempenho final de materiais construtivos, como mostrado na Tab.3.

Tabela 3. Produtos ecológicos derivados da combinação de fibras naturais e resíduos (industriais e agroindustriais).

Produto	Composição ótima	Propriedades estudadas	Ref.
Argamassa	1% de fibra de linho + razão de peso 50:50 de cimento Portland e escória de alto forno	Resistência à compressão, resistência à flexão, absorção de água e ligação interfacial. Idade de cura: 7 e 28 dias.	[77]
Argamassa	0,75% de fibra de alfa ou 0,75% de fibra de tamareira + 15% de escória de alto-forno	Resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à retração total, resistência ao cisalhamento inclinado, resistência ao arrancamento e durabilidade. Idade de cura: 28 dias.	[78]
Argamassa	0,75% de fibra de tamareira + 15% de escória de alto-forno	Resistência à compressão, resistência à tração na flexão, porosidade, permeabilidade à água, risco de fissuração e resistência ao cisalhamento. Idade de cura: 28 dias.	[79]
Argamassa	1% de fibra de sisal + 50% de cinzas volantes	Resistência à flexão, resistência à compressão e ensaio de arrancamento. Idade de cura: 7 e 28 dias.	[80]
Compósitos cimentícios	5% de fibra de eucalipto + 10% de rejeitos de minério de ferro	Exposição ao intemperismo, absorção de água, porosidade aparente, densidade aparente, resistência à flexão estática e tenacidade. Idade de cura: 28 dias. Tempo de envelhecimento: 180 dias.	[81]
Concreto	1% de fibra de basalto + 10% de cinzas de bagaço de cana de açúcar	Trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à tração por compressão, absorção de água e ligação interfacial. Idade de cura: 28 dias.	[82]
Concreto	0,5% a 1% de fibra de bananeira + 10% a 20% de pó de vidro	Resistência à compressão. Idade de cura: 7 - 56 dias.	[83]
Concreto	1% de fibra de luffa + 15% de pó de vidro	Resistência à compressão, resistência à tração e resistência à flexão. Idade de cura: 7 - 28 dias.	[84]
Concreto	1% de fibra de coco + 20% de pó de resíduo cerâmico	Resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão e durabilidade. Idade de cura: 7 - 28 dias.	[85]
Concreto de alta resistência	1% de fibra de cânhamo de manila + 20% de pó de sílica ativa	Trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração e comportamento flexural. Idade de cura: 7 - 90 dias.	[86]

Ghaffar e colaboradores (2020) [77], investigaram argamassas com cimento Portland (OPC), cinza volante pulverizada (FA) e escória de alto-forno granulada moída (GGBS), em seis combinações 100%OPC, 70%OPC-30%FA, 70%FA-30%OPC, 70%GGBS-30%OPC, 50%OPC-50%FA, 50%OPC-50%GGBS, adicionando 1% em volume de fibras naturais de barbante de linho (20-30 mm de comprimento e 5 mm de diâmetro), não revestidas ou revestidas com resina epóxi ou poliuretano. Os corpos de prova prismáticos (160×40×40 mm), seguiram a proporção 1:1,5 de cimento e areia, com relação água/cimento maior para argamassas com fibras naturais reforçadas (0,53) em relação a não reforçada (0,38).

Ensaio de flexão e compressão aos 7 e 28 dias indicaram que a resistência à flexão não aumentou para as amostras que possuíam reforço, mas a ruptura ocorreu em pedaços maiores, com melhor desempenho para fibras com resina epóxi. Na compressão, o efeito foi similar, sendo a composição 50% OPC–50%GGBS com o linho (34 MPa em 28 dias) inferior à matriz sem fibra (58 MPa) e ao 100%OPC (55 MPa), devido à vazios por interação matriz/fibra. O revestimento melhorou a aderência à fibra/matriz. Em absorção de água (48h), argamassas curadas 7 dias mostraram altas taxas, atribuídas à grande área das cinzas volantes e à natureza hidrofílica do linho não revestido; abaixo de 30% de FA, a absorção reduziu.

Kenai e colaboradores (2020) [78], projetaram e investigaram argamassas ecológicas para reparos, usando escória de siderurgia (adição de 15% em peso) como substituição ao cimento e fibras naturais de alfa e tamareira (0,75% em volume). Ensaio em amostras cilíndricas (100 × 200 mm) e cúbicas (4 × 4 × 16 cm) foram realizadas após 28 dias. A resistência à compressão das argamassas com substituição foi ligeiramente menor que as argamassas de referências (30MPa), mas a resistência à flexão aumentou significativamente com as fibras, devido à melhor adesão interna. A incorporação das fibras gerou uma diminuição no coeficiente de absorção para poros grandes e pequenos, assim diminuindo a retração da argamassa e melhorando a durabilidade. Além disso, a escória também contribuiu para a aderência ao cisalhamento inclinado. A análise da resistência ao arrancamento foi realizada em lajes de concreto (70×230×280 mm), cujas superfícies foram tratadas (martelamento e escovação) ou não tratadas, aplicando-se camada de 20 mm de argamassa de reparo. Superfícies não tratadas mostraram menor resistência de ligação (0,14 MPa), enquanto superfícies tratadas com escória e fibras apresentaram maior aderência. As fibras ajudaram a reduzir a fissuração na interface argamassa/substrato, ressaltando a importância de tratar superfícies corroídas antes do reparo.

Yahiaoui e colaboradores (2022) [79], realizaram um estudo comparativo entre o desempenho de argamassas de reparo produzidas em laboratório e três argamassas comerciais. Adicionou-se fibras de tamareira (0,75% em volume) e escória de alto-forno (15% em peso) em substituição parcial ao cimento. Ensaio em corpos de prova cúbicos (100×100×100 mm), prismáticos (40×40×160 mm) e cilíndricos (100×200 mm) foram realizados após 28 dias. A resistência à compressão foi semelhante à amostra controle (30 MPa), devido à melhoria na formação da matriz. Para tração na flexão, observou-se um ligeiro aumento de 3% em relação às argamassas comerciais, mostrando comportamento mais dúctil e coesão pós-fratura. O cisalhamento teve valor próximo à referência de aproximadamente 9 MPa. As fibras preencheram fissuras de retração, aumentando a retração total em 7% em relação à referência. O ensaio de absorção capilar indicou coeficientes de 36% (poros grandes) e 43% (pequenos), valores bem menores que na mistura comercial. A permeabilidade à água diminuiu até 48%, elevando a durabilidade. Assim, as argamassas com escória e fibras de tamareira mostraram desempenho comparável a versões comerciais com fibras sintéticas, sendo opção mais ecológica.

Jin e Han (2024) [80], investigaram o desempenho mecânico e microestrutural de argamassas reforçadas com fibras de sisal (adição 1%) e cinzas volantes (substituição de 50% ao cimento), ativadas com sulfato de sódio (0, 2, 4 e 6%). Os tempos de cura analisados foram de 3, 7, 28 e 56 dias. A mistura com 4% de sulfato de sódio, 50% de cinza volante e 1% de fibras de sisal apresentou aumento expressivo na resistência à flexão. Aos 3 e 7 dias, os incrementos foram de 51 e 46,7%, respectivamente, em comparação ao grupo controle (amostras somente com cimento), mantendo, ainda, sua resistência à compressão. As fibras de sisal contribuíram para reduzir a fragilidade do material. Ensaio de arrancamento mostraram que o sulfato de sódio melhorou a aderência na interface fibra-matriz, aumentando a resistência ao destacamento. Além disso, a adição do ativador acelerou a hidratação e a formação de etringita, favorecendo o desenvolvimento de uma estrutura de gel mais densa e resultando no aumento da resistência mecânica inicial do material. Ao longo do processo de cura, observou-se diminuição da porosidade do material ativado por sulfato de sódio, com redução dos poros prejudiciais e aumento dos poros não prejudiciais, o que garantiu um crescimento contínuo das propriedades mecânicas do compósito.

Eugênio, Henriques e Mendes (2024) [81] desenvolveram compósitos cimentícios reforçados com fibra de celulose de eucalipto, incorporando rejeitos de minério de ferro (IOT) como substituição parcial do cimento. Foram testadas formulações contendo 0, 10, 20, 30 e 40% de IOT e 5% de polpa de celulose, em corpos de prova extrudados (20×30×200 mm), curados por 28 dias.

Os ensaios físicos, mecânicos e microestruturais foram realizados antes e após envelhecimento acelerado (20 ciclos de 24 horas) e imersão em água por 24 horas. Os melhores resultados foram obtidos com a incorporação de 10% de IOT, que proporcionou evolução nas propriedades físicas e mecânicas em comparação ao compósito sem resíduos. No entanto, a partir de 30%, verificou-se uma maior inibição da matriz cimentícia, comprometendo suas propriedades. Todos os compósitos atenderam aos requisitos normativos, sendo que aqueles com 10% e 20% de IOT cumpriram os critérios mais exigentes. Portanto, além de melhorar as propriedades mecânicas e físicas do fibrocimento, o uso de IOT demonstrou potencial para reduzir impactos ambientais, minimizar o descarte de rejeitos de minério de ferro em barragens e diminuir o consumo de cimento.

Arshad e colaboradores [82], investigaram as propriedades mecânicas de concretos com fibras de basalto (BF) e materiais cimentícios suplementares, como sílica ativa (SF) e cinza de bagaço de cana de açúcar (BA). Quinze misturas foram produzidas, variando sílica ativa (0 e 8%), cinza de bagaço (0, 5, 10 e 15%), fibra de basalto (0, 5 e 1%) e superplastificante (1,5 a 2%), em volume do concreto. Observou-se que o aumento da sílica ativa, cinza de bagaço de cana de açúcar e fibras de basalto reduziu a trabalhabilidade, exigindo mais superplastificante. SF e de BA melhoraram a resistência à compressão, sendo 10% de BA o mais eficiente em união à presença de BF, o que produziu menor impacto na resistência. Para a resistência à flexão, compósitos com BF apresentaram melhor desempenho ao propagar gradualmente as fissuras, possibilitando o efeito de ponte das fibras. O módulo de ruptura e a absorção de energia na flexão foram maximizados na composição com 10% de BA e 1% de BF. Para absorção de água, a adição de BA e BF aumentaram a porcentagem de absorção, enquanto a adição de SF resultou e em valores mais reduzidos. Os autores concluíram que em proporções ideais, a adição de fibra de basalto e materiais pozolânicos podem contribuir para o concreto com melhor desempenho.

Olukayode e colaboradores [83] realizaram análise computacional por superfície de resposta para avaliar a resistência à compressão com a variação dos rejeitos. Fibras de bananeira (0,5, 1,0 e 1,5%) e pó de vidro (10, 20 e 30%, em substituição ao cimento) foram aplicados no concreto para análise de 7, 28 e 56 dias. O pó de vidro, menor que 23 µm (fração passante na peneira), foi usado junto a fibras tratadas com 10% de NaOH a 100 °C/30 min, cortadas em 25 mm. Corpos de prova prismáticos (150 mm) foram moldados com traço 1:1:2 (cimento:areia:brita) em 10 variações de mistura. Após obtidos os resultados experimentais, foram analisados por metodologia de superfície de resposta, indicando que a variação da quantidade de fibra no concreto impactou significativamente a resistência à compressão para todos os períodos de cura, enquanto que o pó de vidro só apresentou resposta favorável após os 28 e 56 dias. Foi possível constatar que o conjunto ideal de fibra de banana e substituição de cimento pelo pó de vidro, respectivamente, foi de 1 e 17,4% (cura de 7 dias), 1,1 e 20,8% (28 dias) e 1 e 21% (56 dias). Estes aumentaram a resistência mecânica em 11,0, 22,1 e 27,0% em relação ao compósito referência, mostrando que o método é eficaz para análise de combinações que melhoram o desempenho mecânico.

Anandaraj e colaboradores (2023) [84], desenvolveram um concreto reforçado com fibra de lufa utilizando pó de vidro como substituto do cimento. Para tanto, a abordagem foi realizada em duas etapas. Na primeira fase, apenas o cimento foi substituído por pó de vidro em porcentagens variando entre 5 e 20%, com tempos de cura de 7 e 28 dias. Verificou-se que o valor ótimo para a substituição do cimento foi de 15%, contribuindo em resistência à compressão, tração e flexão cerca de 5,5, 25,25 e 22,94% maiores do que o concreto convencional, respectivamente, com 28 dias de cura. Na segunda etapa, mantendo o percentual de pó de vidro constante, variou-se os percentuais de adição da fibra de lufa (0,5, 1, 1,5 e 2%) à matriz cimentícia para os mesmos dias de cura. O melhor resultado foi para amostras (28 dias) contendo 1% de adição da fibra, apresentando resistência à compressão de 8,8%, resistência à tração de 35,89% e resistência à flexão de 29,43%, superiores aos do concreto convencional. Portanto, os autores verificaram que pó de vidro com a fibra de lufa melhoraram as propriedades mecânicas, especialmente a resistência à tração das amostras de concreto.

Anandaraj e seus colaboradores (2024) [85] verificaram as características mecânicas do concreto com fibra de coco e pó de resíduos cerâmicos. O cimento foi parcialmente substituído por pó de resíduo cerâmico (0, 20, 40, 60 e 80%) e com adições de fibras de coco (0, 0,5, 1 e 2%). Corpos de provas cilíndricos (100×200 mm) foram curados por 7, 14 e 28 dias. O melhor desempenho ocorreu com 1% de fibra de coco e 20% de pó de resíduo cerâmico após 28 dias, conforme evidenciado nos

ensaios de resistência à compressão, tração, flexão e durabilidade. A resistência à compressão foi 16,97% maior que o controle. A tração foi otimizada pelas fibras de coco acompanhadas do pó de resíduos cerâmicos, promovendo a distribuição uniforme das tensões. A combinação também elevou a coesão entre as matriz e agregados em 25,43% em relação ao concreto de referência. Após 60 dias de exposição ao ácido sulfúrico e ao ácido clorídrico, os corpos de prova destacaram-se com melhor resistência ao ataque ácido. A característica pozolânica do pó de resíduo cerâmico minimizou a permeabilidade do concreto, assim diminuindo a sua suscetibilidade a danos por ácido, o que resultou em menor perda de peso (6,6%) em comparação as amostras expostas ao ácido clorídrico (4,04%) e ao concreto de referência (9,52%).

Subban, Muthusamy e Natarajan (2024) [86] investigaram a combinação de fibras de cânhamo de Manila (0, 0,5, 1, 1,5, e 2%, por volume) e de sílica ativa (0% a 30%, incremento de 5% em massa de cimento) no concreto de alta resistência (CAR). As amostras foram preparadas com a razão água/cimento de 0,30 e curadas por 7, 14, 28, 36 e 90 dias. Até 1,5% de fibras e 20% de sílica ativa proporcionou aumento da resistência mecânica (compressão e tração 28 dias) em 21% e a propriedade de flexão (28 dias) em 18%, atribuído às suas propriedades pozolânicas e capacidade de otimizar o empacotamento de partículas. Teores maiores reduziram a trabalhabilidade e a resistência, pois partículas finas aumentaram a viscosidade e as fibras elevaram a resistência interna à compactação. Assim, o CAR com 1% de fibras naturais e 20% de sílica ativa, foi aquele que atingiu equilíbrio entre trabalhabilidade aceitável, e as melhores propriedades mecânicas e comportamento de flexão. Essa abordagem combinada foi efetiva para o desenvolvimento de CAR com desempenho avançado. A incorporação de sílica ativa aumentou a resistência mecânica para todas as idades de cura e a durabilidade do CAR, enquanto a adição de fibras de cânhamo Manila melhorou a tenacidade e a resistência à fissura, ainda que tenha comprometido alguma resistência à compressão e à tração.

De forma geral, independente da combinação de fibra natural e do resíduo pozolânico aplicados, observou-se a necessidade de otimização dos teores individuais desses materiais para manter um bom equilíbrio entre as propriedades finais desejadas nos produtos construtivos. Nesse sentido, a natureza complementar desses componentes resulta em materiais de construção com desempenho aprimorado em termos de resistência à compressão e flexão, capacidade de absorção de energia e índice de tenacidade, dentre outros, comparativamente às aplicações com os sem elementos individuais.

5. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre o uso combinado de fibras naturais e resíduos pozolânicos na formulação de compósitos cimentícios sustentáveis, com ênfase na substituição parcial do cimento. A proposta partiu da necessidade premente de alternativas mais ecológicas e economicamente viáveis para a indústria da construção civil, um setor historicamente marcado por elevado consumo de recursos naturais e emissões de CO₂.

A partir do levantamento nas bases de dados, foram identificados 10 artigos elegíveis, os quais compuseram o corpus da pesquisa. Embora esse número seja relativamente pequeno, evidencia uma produção científica relevante na atualidade, alinhada a questões emergentes, como a redução de emissões de CO₂, a economia circular e o uso de resíduos, todos altamente debatidos na ciência contemporânea e nas políticas globais (como os ODS da ONU).

A análise dos estudos selecionados revelou que a incorporação de até 1% de fibras naturais e até 20% de resíduos industriais e agroindustriais, em substituição ao cimento, foi ideal para melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios, como resistência à compressão, tração e flexão. Além disso, a maioria dos estudos destacou que as fibras naturais contribuíram significativamente para o aumento da resistência à fissuração, devido à sua capacidade de controlar a propagação de fissuras, promovendo maior tenacidade e estabilidade estrutural aos compósitos.

No entanto, alguns estudos também destacaram que altos teores de fibras naturais e resíduos comprometeram a hidratação e a formação de uma estrutura coesa, ou contribuíram para falhas na interface entre matriz e fibra. Estes fatores afetaram a integridade e a resistência mecânica dos produtos finais. Em relação à trabalhabilidade, alguns trabalhos reportaram que o aumento na incorporação de materiais suplementares e fibras resultou em uma redução significativa dessa propriedade, devido ao aumento da viscosidade e resistência interna à compactação. Em adição, foi relatado também que a

incorporação das fibras naturais impactou na absorção de água e durabilidade dos materiais de maneira variada, resultando na diminuição dos coeficientes de absorção de água e de permeabilidade à água, reduzindo a retração e elevando a durabilidade para aquelas composições com teores considerados recomendados com base nas análises experimentais.

Apesar dos avanços obtidos, ainda são observadas algumas limitações relevantes. Para assegurar o desempenho e a vida útil a longo prazo dos compósitos cimentícios sustentáveis, para além de agentes físicos destacados na revisão, se faz necessário mais estudos sobre outros fatores agressivos (variação de temperatura, ação química e biológica), além de resistência ao fogo e a escalabilidade industrial. São pesquisas que devem ser consideradas para permitir que o produto final seja mais atrativo comercialmente.

Diante dos avanços observados com o uso de fibras naturais e resíduos pozolânicos, futuras revisões da literatura podem ampliar o escopo para incluir outros materiais alternativos com potencial de aprimorar as propriedades das argamassas. Destacam-se, nesse contexto, os resíduos de construção e demolição finamente moídos, resíduos de papel e celulose, polímeros reciclados e nanomateriais.

REFERÊNCIAS

- [1] Zairul M, Zaremohzzabieh Z, 2023. Thematic trends in industry 4.0 revolution potential towards sustainability in the construction industry. *Sustainability* 15, 7720. <https://doi.org/10.3390/su15097720>
- [2] Andrusiv U, Zelinska H, Lagodiienko V, 2024. Ecological modernization at construction industry enterprises as an innovative production and management technology. *Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology* 9, 22–7. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2024-2-3>
- [3] Shurrab J, Hussain M, Khan M, 2019. Green and sustainable practices in the construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management* 26, 1063–86. <https://doi.org/10.1108/ecam-02-2018-0056>
- [4] Moolchandani K, Sharma A, Kishan D, 2024. Enhancing concrete performance with crumb rubber and waste materials: a study on mechanical and durability properties. *Buildings* 14, 161. <https://doi.org/10.3390/buildings14010161>
- [5] Amsalu F T, Chande J Y A, Kivevele T, 2024. Modeling and optimization of sisal fiber degradation treatment by calcined bentonite for cement composite materials. *Journal of Natural Fibers* 21. <https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2408632>
- [6] He J, Kawasaki S, Achal V, 2020. The utilization of agricultural waste as agro-cement in concrete: a review. *Sustainability* 12, 6971. <https://doi.org/10.3390/su12176971>
- [7] Sharma S, Lalotra S, 2022. To study the behavior of concrete by replacement of fine aggregate with granite powder and cement with tobacco waste ash. *Int J Res Appl Sci Eng Technol* 10, 844–53. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.46745>
- [8] Fode T A, Jande Y A C, Kim Y-D, Ham M-G, Lee J, Kivevele T, Rahma N, 2025. Effects of different lengths and doses of raw and treated sisal fibers in the cement composite material. *Sci Rep* 15, 1603. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86046-3>
- [9] Silva E J, Marques M L, Velasco F G, Fornari Jr C, Luzardo F M, Tashima M M, 2017. A new treatment for coconut fibers to improve the properties of cement-based composites. Combined effect of natural latex/pozzolanic materials. *Sustainable Materials and Technologies* 12, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2017.04.003>
- [10] Asprone D, Durante M, Prota A, Manfredi G, 2011. Potential of structural pozzolanic matrix–hemp fiber grid composites. *Constr Build Mater* 25, 2867–74. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.046>
- [11] Mejia-Ballesteros J E, Rodier L, Filomeno R, Savastano Jr H, Fiorelli J, Rojas M F, 2021. Influence of the fiber treatment and matrix modification on the durability of eucalyptus fiber reinforced composites. *Cem Concr Compos* 124, 104280. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104280>
- [12] Saad M, Sabathier V, Turatsinze A, Magniont C, 2019. Potential of oleaginous flax fibre as mortar reinforcement. *Academic Journal of Civil Engineering* 37. <https://doi.org/10.26168/icbbm2019.38>
- [13] Afraz A, Ali M, 2021. Effect of banana fiber on flexural properties of fiber reinforced concrete for sustainable construction. *Engineering Proceedings* 12. <https://doi.org/10.3390/engproc2021012063>
- [14] Shcherban' E M, Stel'makh S A, Beskopylny A N, Mailyan L R, Meskhi B, Shilov A A, 2022. Normal-weight concrete with improved stress–strain characteristics reinforced with dispersed coconut fibers. *Applied Sciences* 12, 11734. <https://doi.org/10.3390/app122211734>
- [15] Yang B, Wang C, Chen S, Qiu K, Jiang J, 2023. Optimisation of the mechanical properties and mix proportion of multiscale-fibre-reinforced engineered cementitious composites. *Polymers (Basel)* 15, 3531. <https://doi.org/10.3390/polym15173531>
- [16] P Salgado I, de Andrade S F, 2021. Flexural behavior of sandwich panels combining curauá fiber-reinforced composite layers and autoclaved aerated concrete core. *Constr Build Mater* 286, 122890. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122890>
- [17] Yimer T, Gebre A, 2023. Effect of fiber treatments on the mechanical properties of sisal fiber-reinforced concrete composites. *Advances in Civil Engineering* 2023, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2023/2293857>
- [18] Ercikdi B, Cihangir F, Kesimal A, Deveci H, Alp İ, 2009 Utilization of industrial waste products as pozzolanic material in cemented paste backfill of high sulphide mill tailings. *J Hazard Mater* 168, 848–56. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.100>
- [19] Martins L F M, Junior R R S P, Silva H T, de Souza M P, P P I, Bezerra C S A, 2021. Magnesium industry waste and red mud to eco-friendly ternary binder: Producing more sustainable cementitious materials. *Constr Build Mater* 310, 125172. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125172>

- [20] Arowojolu O, Ibrahim A, McDonald A, 2022. The effect of including biomass on the rheological and pozzolanic properties of Portland limestone cement- case study. *Sustainable Structures* 3. <https://doi.org/10.54113/j.sust.2023.000024>
- [21] Torres-Ortega R, Torres-Sanchez D, Lopez-Lara T, 2025. Mechanical properties of hydraulic concretes with partial replacement of Portland cement by pozzolans obtained from agro-industrial residues: a review. *Heliyon* 11, e41004. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41004>
- [22] Rosa B H, Gurdewicz R P, Wanderlind A, Piccinini Â C, Piva J H, Antunes E G P, 2023. Análise das características pozolânicas do resíduo de esmalte cerâmico (REC). *Cerâmica Industrial* 28, 1–7. <https://doi.org/10.4322/cerind.2023.020>
- [23] Li X, Fan Y, Wu C, Wang L, 2024. Advances in molecular dynamics-based characterization of water and ion adsorption and transport in C-S-H gels. *Polymers (Basel)* 16, 3285. <https://doi.org/10.3390/polym16233285>
- [24] Hu C, Han Y, Gao Y, Zhang Y, Li Z, 2014. Property investigation of calcium-silicate-hydrate (C–S–H) gel in cementitious composites. *Mater Charact* 95, 129–39. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.06.012>
- [25] Kasaniya M, Thomas M D A, Moffatt T, Hossack A, 2025. Significance of fineness of pozzolans in determining pozzolanic reactivity. *Cement* 19, 100137. <https://doi.org/10.1016/j.cement.2025.100137>
- [26] Morais A, Dourado J B de O L, Lima E K A, Resende C X, Paz G M, Matos J M E, Santos V B, 2022. Argamassa cimentícia: uso sustentável de pó fino de vidro reciclado como precursor parcial. *Cerâmica Industrial* 27, 1–11. <https://doi.org/10.4322/cerind.2022.008>
- [27] Almutlaqah A, Maddalena R, Kulasegaram S, 2025. Optimising thermo-mechanical treatments of residual rice husk ash for cement blending. *Case Studies in Construction Materials* 22, e04103. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04103>
- [28] Wang K, Guo S, Yuan H, Ren J, Chen P, Zhang Q, 2025. Influence of cement particle size, ultra-fine fly ash, and ultra-fine silica fume on the physical and microscopic properties of slurry. *Case Studies in Construction Materials* 22, e04337. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04337>
- [29] Kim J, Fumino H, Kanematsu M, 2024. Effects of rice husk ash particle size and luxan value influence on mortar properties and proposal of hydration ratio measurement method. *Materials* 18, 21. <https://doi.org/10.3390/ma18010021>
- [30] Kasaniya M, Thomas M D A, Moffatt E G, 2021. Efficiency of natural pozzolans, ground glasses and coal bottom ashes in mitigating sulfate attack and alkali-silica reaction. *Cem Concr Res* 149, 106551. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106551>
- [31] Chihaoui R, Siad H, Senhadji Y, Mouli M, Nefoussi AM, Lachemi M, 2022. Efficiency of natural pozzolan and natural perlite in controlling the alkali-silica reaction of cementitious materials. *Case Studies in Construction Materials* 17, e01246. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01246>
- [32] Fediuk R, Makarova N, Kozin A, Lomov M, Petropavlovskaya V, Novichenkova T, 2023. Nanomodified basalt fiber cement composite with bottom ash. *Journal of Composites Science* 7, 3, 96; <https://doi.org/10.3390/jcs7030096>
- [33] Benameur S A, Siad H, Lachemi M, Houmadi Y, 2024. Development of sustainable self-healing engineered cementitious composites incorporating maximum amounts of natural pozzolan. *Constr Build Mater* 456, 139278. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139278>
- [34] Shoji D, He Z, Zhang D, Li V C, 2022. The greening of engineered cementitious composites (ECC): a review. *Constr Build Mater* 327, 126701. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126701>
- [35] Lilargem R D, Tambara Jr L, Marvila M, Pereira E, Souza D, de Azevedo A, 2022. A Review of the use of natural fibers in cement composites: concepts, applications and Brazilian history. *Polymers (Basel)* 14, 2043. <https://doi.org/10.3390/polym14102043>
- [36] Sistema Indústria, 2025. Indústria da construção. <https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/industria-da-construcao>
- [37] IBGE, 2024. Brasil. PIB taxa de crescimento anual 2024. <https://pt.tradingeconomics.com/brazil/gdp-growth-annual>
- [38] Ministério do Trabalho e Emprego, 2023. Relação anual de informações sociais, RAIS 2023. <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/estatisticas-trabalho/rais/rais-2023>
- [39] CBIC, 2024. CBIC projeta crescimento de 4,1% para a construção civil em 2024, mas desafios persistem para 2025. <https://cbic.org.br/cbic-projeta-crescimento-de-41-para-a-construcao-civil-em-2024-mas-desafios-persistem-para-2025>
- [40] Lima R R F, 2024. Produtos ecológicos para a indústria da construção civil. *Cerâmica Industrial* 29, e0529. <https://doi.org/10.4322/cerind.2024.042>
- [41] UNODC, 2015. The 2030 agenda for sustainable development 2015. United Nations Office on Drugs and Crime. <https://www.unodc.org/>
- [42] Hasibuan G C R, Al Fath M T, Yusof N, Dewi R A, Syafridon G G A, Jaya I, 2025. Integrating circular economy into construction and demolition waste management: a bibliometric review of sustainable engineering practices in the built environment. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 11, 101159. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2025.101159>
- [43] Ajabli H, Zoubir A, Elotmani R, Louzazni M, Kandoussi K, Daya A, 2023. Review on eco-friendly insulation material used for indoor comfort in building. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 185, 113609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113609>
- [44] Araújo de A M, Colombo R, 2021. Construction of green roofs via using the substrates made from humus and green coconut fiber or sugarcane bagasse. *Sustain Chem Pharm* 22, 100477. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100477>
- [45] Matos W E de C, Silva H de J B da, Paz G M da, Santos V B, 2021. Utilização de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como material de preenchimento estrutural ou pozolânico para a produção de argamassas cimentícias: uma revisão. *Matéria (Rio de Janeiro)* 26. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620210004.1322>
- [46] Kapoor R T, Rafatullah M, 2025. Valorization of industrial and agro-wastes for production of green construction materials: an innovative circular economy approach. In: Khan A H, Akhtar M N, Bani-Hani K A, (eds.). *Recent Developments and Innovations in the Sustainable Production of Concrete*, Woodhead Publishing, 3–24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23895-6.00001-7>
- [47] de Oliveira L D J B, Alves M E R, de O Jr W A, de Oliveira B L M, Silva J B H, López-Galindo A, 2023. Babassu fibers as green mortar additives. *Journal of Natural Fibers* 20. <https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2256471>

- [48] Saini K, Matsagar V, Kodur V, 2023. recent advances in the use of natural fibers in civil engineering structures. *Constr Build Mater* 411, 134364. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134364>
- [49] Fadlilmola A B F A, Chen Z, Du Y, Ma R, Ma J, 2021. Experimental investigation and design method on a lightweight bamboo-concrete sandwich panel under bending load. *Structures* 34, 856–74. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.030>
- [50] Veigas M G, Najimi M, Shafei B, 2022. Cementitious composites made with natural fibers: investigation of uncoated and coated sisal fibers. *Case Studies in Construction Materials* 16, e00788. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00788>
- [51] Camargo M, Adefrs Taye E, Roether J, Tilahun Redda D, Boccaccini A, 2020. A Review on natural fiber-reinforced geopolymer and cement-based composites. *Materials* 13,4603. <https://doi.org/10.3390/ma13204603>
- [52] Kumar SS, Shyamala P, Pati PR, Giri J, Makki E, Sathish T, 2024. Mechanical (static and dynamic) characterization and thermal stability of hybrid green composites for engineering applications. *Journal of Materials Research and Technology* 30, 7214–27. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.132>
- [53] Lee G-W, Choi Y-C, 2022. Effect of abaca natural fiber on the setting behavior and autogenous shrinkage of cement composite. *Journal of Building Engineering* 56, 104719. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104719>
- [54] Hasan R, Sobuz Md H R, Akid A S M, Awall Md R, Houda M, Saha A, Meraz Md S, Sutan N M, 2023. Eco-friendly self-consolidating concrete production with reinforcing jute fiber. *Journal of Building Engineering* 63, 105519. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105519>
- [55] Ezugwu E K, Calabria-Holley J, Paine K, 2023. Physico-mechanical and morphological behavior of hydrothermally treated plant fibers in cementitious composites. *Ind Crops Prod* 200, 116832. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116832>
- [56] Lamichhane N, Lamichhane A, Gyawali T R, 2024. Enhancing mechanical properties of mortar with short and thin banana fibers: A sustainable alternative to synthetic fibers. *Heliyon* 10, e30652. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30652>
- [57] Ahmad W, Farooq S, Usman M, Khan M, Ahmad A, Aslam F, Yousef R A, Abduljabbar H A, Sufian M, 2020. Effect of coconut fiber length and content on properties of high strength concrete. *Materials* 13, 1075. <https://doi.org/10.3390/ma13051075>
- [58] Balaji D, Kumar P, v B, Kumar L R, Bhuvaneshwari V, Rajeshkumar L, Singh M K, Sanjay M R, Siengchin S, 2024. A review on effect of nanoparticle addition on thermal behavior of natural fiber–reinforced composites. *Heliyon* e41192. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41192>
- [59] Bui H, Boutouil M, Sebaibi N, Levacher D, 2022. Hydration characteristics of coconut fibre-reinforced mortars containing CSA and Portland cement. *J Mater Cycles Waste Manag* 24, 1295–303. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01401-0>
- [60] Balasubramanian M, Saravanan R, T S, 2024. Exploring natural plant fiber choices and treatment methods for contemporary composites: a comprehensive review. *Results in Engineering* 24, 103270. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103270>
- [61] Elayaraja R, Rajamurugan G, 2024. Recent development and efficacy of wire mesh embedded natural fiber composite: a review. *Results in Engineering* 24, 103141. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103141>
- [62] Patil R R, Katare V D, 2023. Application of fiber reinforced cement composites in rigid pavements: a review. *Mater Today Proc* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.415>
- [63] Gholampour A, Ozbakkaloglu T, 2019. A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications. *J Mater Sci* 55, 829–92. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03990-y>
- [64] Kaima J, Preechawuttipong I, Peyroux R, Jongchansitto P, Kaima T, 2023. Experimental investigation of alkaline treatment processes (NaOH, KOH and ash) on tensile strength of the bamboo fiber bundle. *Results in Engineering* 18, 101186. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101186>
- [65] Al-Ghaban A, Jaber H, Shaher A, 2018. Investigation of addition different fibers on the performance of cement mortar. *Engineering and Technology Journal* 36, 957–65. <https://doi.org/10.30684/etj.36.9a.3>
- [66] Ahmed S, Islam M, 2018. Influence of jute fiber on concrete properties. *Constr Build Mater* 189, 768–76. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.048>
- [67] Abdalla J A, Thomas B S, Hawileh R A, 2022. Use of hemp, kenaf and bamboo natural fiber in cement-based concrete. *Mater Today Proc* 65, 2070–2. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.428>
- [68] Sinkhonde D, Bezabih T, Mirindi D, 2025. Particle size distributions and shape identification of pozzolanic materials via various dimensional representations. *Hybrid Advances* 8, 100384. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100384>
- [69] Sachdeva N, Shrivastava N, Shrivastava S, 2023. Pozzolanic reaction and strength activity index of dolomite powder incorporated cement mortar. *Mater Today Proc* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.042>
- [70] Panato V D, Nieves L J J, Gurkewicz R de P, Piccinini Â C, Piva J H, Antunes E G P, 2023. Estudo de atividade pozzolânica da cinza de casca de arroz residual moída em distintos tempos de moagem. *Cerâmica Industrial* 28, e122801. <https://doi.org/10.4322/cerind.2023.021>
- [71] NBR-12653, 2014. Materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [72] Suthaagar V, Selvaraj T, 2025. Influence of relative humidity and temperature on shell lime mortar with the addition of acacia gum and rice soup. *Budownictwo i Architektura* 24, 133–45. <https://doi.org/10.35784/bud-arch.6718>
- [73] Snellings R, Mertens G, Elsen J, 2012. Supplementary cementitious materials. *Rev Mineral Geochem* 74, 211–78. <https://doi.org/10.2138/rmg.2012.74.6>
- [74] Bezerra I M T, Souza J, Carvalho J B Q de, Neves GA, 2011. Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 15, 639–45. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662011000600015>
- [75] Py L G, Neto J S A, Longhi M A, Kirchheim A P, 2024. Evaluation of ultrafine calcined clays on LC3 cements on the sulfate requirement, water demand and strength development. *Mater Struct* 57, 13. <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02288-5>
- [76] Ahmad J, Zaid O, Siddique M S, Aslam F, Alabduljabbar H, Khedher K M, 2021. Mechanical and durability characteristics of sustainable coconut fibers reinforced concrete with incorporation of marble powder. *Mater Res Express* 8, 075505. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac10d3>

- [77] Ghaffar S H, Al-Kheetan M, Ewens P, Wang T, Zhuang J, 2020. Investigation of the interfacial bonding between flax/wool twine and various cementitious matrices in mortar composites. *Constr Build Mater* 239, 117833. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117833>
- [78] Kenai A, Rezagui M, Yahiaoui W, Menadi B, Kenai S, 2020. Performance of repair mortar with natural fibers. *MRS Adv* 5, 1295–304. <https://doi.org/10.1557/adv.2020.178>
- [79] Yahiaoui W, Kenai A, Menadi B, Kenai S, 2022. Mechanical performance and durability of date palm fibers repair mortar. *The Open Civil Engineering Journal* 16. <https://doi.org/10.2174/18741495-v16-e2207271>
- [80] Jin W, Han C, 2024. Mechanical properties of sisal fiber-reinforced fly ash cement mortar activated by sodium sulfate. *Constr Build Mater* 445, 137925. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137925>
- [81] Eugenio T M C, Henriques A B, Mendes R F, 2024. Use of iron ore tailings as partial replacement for cement on cementitious composites production with vegetable fibers. *Constr Build Mater* 411, 134667. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134667>
- [82] Arshad S, Sharif M B, Irfan-ul-Hassan M, Khan M, Zhang J-L, 2020. Efficiency of supplementary cementitious materials and natural fiber on mechanical performance of concrete. *Arab J Sci Eng* 45, 8577–89. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04769-z>
- [83] Olukayode O M, Akinwande AA, Balogun O A, Oyediran A O, Mosuru S G, Abdulwahid M Y, Romanovski V, 2023. Applicability of the response surface method in the optimization of compressive strengths of banana-fiber-reinforced concrete using waste glass as partial cement replacement. *Innovative Infrastructure Solutions* 8. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01178-7>
- [84] Anandaraj S, Raja K, Mohamad Abbas M, Madan Kumar T, Varatharajan K, Nivashini N, 2023. Experimental study on luffa fiber reinforced concrete using glass powder as cement replacement. *Mater Today Proc* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.501>
- [85] Anandaraja S, Krishnaraja A R, Kulanthaivel P, Murugan P C, 2024. Influence of ceramic waste powder (CWP) in strength and durability performance of coir fiber reinforced concrete. *Journal of Ceramic Processing Research* 25, 41–7. <https://doi.org/10.36410/jcpr.2024.25.1.41>
- [86] Subban N, Muthusamy N, Natarajan B, 2024. Optimizing high strength concrete: a comprehensive study on the synergistic effects of natural fibres and silica fume on workability, mechanical and flexural behavior. *Matéria* 29. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2024-0525>
- [87] Patel D, Shrivastava R, Tiwari R P, Yadav R K, 2020. Properties of cement mortar in substitution with waste fine glass powder and environmental impact study. *Journal of Building Engineering* 27, 100940. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100940>
- [88] Li G, Zhou C, Ahmad W, Usanova KI, Karelina M, Mohamed A M, 2022. Fly ash application as supplementary cementitious material: a review. *Materials* 15, 2664. <https://doi.org/10.3390/ma15072664>
- [89] Khan M N N, Jamil M, Karim M R, Zain M F M, Kaish A B M A, 2017. Filler effect of pozzolanic materials on the strength and microstructure development of mortar. *KSCE Journal of Civil Engineering* 21, 274–84. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0737-5>
- [90] Kim S K, Yang H J, 2021. Utilization of liquid crystal display (LCD) waste glass powder as cementitious binder in mortar for enhancing neutron shielding performance. *Constr Build Mater* 270, 121859. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121859>
- [91] Nassar R-U-D, Singh N, Varsha S, Sai AR, Sufyan-Ud-Din M, 2022. Strength, electrical resistivity and sulfate attack resistance of blended mortars produced with agriculture waste ashes. *Case Studies in Construction Materials* 16, e00944. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00944>
- [92] Nahi S, Leklou N, Khelidj A, Oudjit M N, Zenati A, 2020. Properties of cement pastes and mortars containing recycled green glass powder. *Constr Build Mater* 262, 120875. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120875>
- [93] Tapas M J, Sofia L, Vessalas K, Thomas P, Sirivivatnanon V, Scrivener K, 2021. Efficacy of SCMs to mitigate ASR in systems with higher alkali contents assessed by pore solution method. *Cem Concr Res* 142, 106353. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106353>
- [94] Wongpaun A, Tangchirapat W, Suwan T, Fan M, 2023. Factors affecting compressive strength and expansion due to alkali-silica reaction of fly ash-based alkaline activated mortar. *Case Studies in Construction Materials* 19, e02595. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02595>
- [95] Letelier V, Bustamante M, Olave B, Martínez C, Ortega J M, 2023. Properties of mortars containing crumb rubber and glass powder. *Developments in the Built Environment* 14, 100131. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100131>
- [96] Liu G, Florea M V A, Brouwers H J H, 2019. Performance evaluation of sustainable high strength mortars incorporating high volume waste glass as binder. *Constr Build Mater* 202, 574–88. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.110>
- [97] Abderraouf Belkadi A, Kessal O, Berkouche A, Noui A, Eddine Daguiani S, Dridi M, 2024. Experimental investigation into the potential of recycled concrete and waste glass powders for improving the sustainability and performance of cement mortars properties. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 64, 103710. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103710>