

Avaliação Técnica da Utilização de Aditivos Biocidas em Compósitos Cimentícios

Ândria Deves Alves (adalves@ucs.br)
Graduanda em Engenharia Civil, Universidade de Caxias do Sul

Vinício Ceconello (vceconello@ucs.br)
Mestre em Engenharia Civil, Universidade de Caxias do Sul

Submetido em: 05/07/2023 Revisado em: 07/08/2023 Aceito em: 11/09/2023

DOI: 10.18226/25253824.v7.n12.09

Resumo: Embora os compósitos cimentícios tenham várias aplicações, eles ainda apresentam limitações em suas características, incluindo a biodeterioração, devido a ação dos microrganismos. A fim de melhorar essa condição, adicionou-se óxido de zinco (ZnO) como aditivo biocida, com a finalidade de agregar melhor desempenho perante a ação dos microrganismos, além de materiais pozzolânicos, as cinzas de casca de arroz, que, de forma conjunta com o aditivo biocida, podem melhorar a resistência mecânica e a absorção de água por capilaridade do compósito cimentício. Neste estudo, avaliaram-se as propriedades de compósitos cimentícios com a adição de óxido de zinco (ZnO) e cinza de casca de arroz (CCA) no estado fresco e endurecido. Foram desenvolvidos traços, variando as adições, em relação a massa de cimento, de ZnO em zero, 5%, 10%, 15% e 20%, além de fixado 10% de CCA, 0,042% de superplastificante e sua relação a/c de 0,5. Para avaliar o desempenho dos compósitos cimentícios, foram realizados ensaios de consistência, resistência à compressão e tração na flexão, absorção de água total e parcial por capilaridade, além da análise visual das propriedades biocidas. Verificou-se uma grande fragilidade nas amostras com incorporação do aditivo biocida, demonstrando queda na sua trabalhabilidade, redução nas resistências em até 97% para tração na flexão aos sete dias e em até 98% para compressão aos sete dias, uma absorção de água por capilaridade três vezes maior que a de referência bem como um retardo no tempo de cura dos materiais. A análise visual demonstrou pequena variação no tempo delimitado.

Palavras-Chave: Aditivos biocidas. Aditivos bactericidas. Microrganismos. Compósitos Cimentícios. Óxido de zinco.

Abstract: Although cementitious composites have various applications, they still have limitations in their characteristics, including biodeterioration due to the action of microorganisms. In order to improve this condition, zinc oxide (ZnO) was added as a biocide additive, aiming to enhance the performance against microorganisms' action, along with pozzolanic materials like rice husk ash, which, together with the biocide additive, can improve the mechanical strength and water absorption through capillarity of the cementitious composite. In this study, the properties of cementitious composites with the addition of zinc oxide (ZnO) and rice husk ash (RHA) were evaluated in both the fresh and hardened states. Mix designs were developed, varying the additions of ZnO in relation to the cement mass at zero, 5%, 10%, 15%, and 20%, with a fixed 10% of RHA, 0.042% of superplasticizer, and a water-to-cement ratio of 0.5. To assess the performance of the cementitious composites, tests were conducted for consistency, compressive strength, flexural tensile strength, total water absorption, partial water absorption through capillarity, and visual analysis of biocidal properties. The samples with the incorporation of the biocide additive showed significant fragility, leading to a decrease in workability and reductions in strength of up to 97% for flexural tensile strength at seven days and up to 98% for compressive strength at seven days. The water absorption through capillarity was three times higher than the reference, and there was a delay in the curing time of the materials. Visual analysis showed minor variations within the specified timeframe.

Keywords: Biocidal additives. Bactericidal additives. Microorganisms. Cementitious Composites. Zinc oxide.

1. Introdução

Os compósitos são materiais compostos por dois ou mais insumos, ambos com suas propriedades e características, resultando em um elemento de atributos superiores. O concreto é um material compósito cimentício, ao qual se adicionam agregados e/ou aditivos para conferir características como trabalhabilidade, consistência e resistência, entre outras qualidades que o tornam adequado para diversas aplicações [1]. Por outro lado, as argamassas, que também são compósitos cimentícios, assumem um papel relevante no revestimento de edificações, tanto interna como externamente, com a finalidade de protegê-las contra manifestações patológicas que poderiam prejudicar sua estrutura. Um exemplo prático dessa utilização é o rejuntamento de cerâmicas ou revestimentos, cujo propósito é impedir a proliferação de microrganismos. Esses microrganismos tendem a se desenvolver principalmente devido à absorção da umidade do ambiente e à presença de sujidade [2].

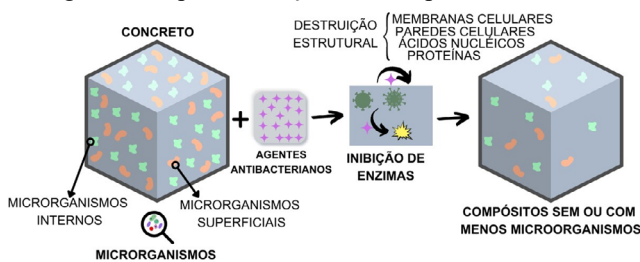
A infiltração de microrganismos em compósitos cimentícios é um problema comum em estruturas expostas a

ambientes agressivos [3]. Esse crescimento de microrganismos resulta principalmente no manchamento e na desagregação das superfícies, devido à produção de ácidos orgânicos que atacam os aglomerantes [2]. Ainda, ao estudar os efeitos que os microrganismos têm sobre os materiais cimentícios, demonstrou-se uma redução de 10% na capacidade de geração hidrelétrica em tubulações que possuem presença de microrganismos em suas paredes, já que sofrem, principalmente, com o problema do entupimento dessas conexões, ocasionado por organismos desprendidos das faces internas desses tubos. Ao realizar a manutenção, têm-se a necessidade da limpeza dessas superfícies, o que acarreta maior erosão do material, deixando o ambiente ainda mais propício para a proliferação desses microrganismos, visto que aumenta sua porosidade e rugosidade [4].

Para solucionar essa questão, é necessário adicionar aditivos com propriedades bactericidas, fungicidas ou inseticidas ao concreto. Esses compostos são tóxicos para os microrganismos responsáveis pela sujidade, permitindo a limpeza do concreto sem a necessidade de sua remoção [1]. O funcionamento dos compósitos cimentícios biocidas pode ser simplificado por meio

de um esquema, em que, para se alcançar um compósito cimentício livre da presença de microrganismos tanto na superfície quanto na sua parte interna, se faz necessária a adição do agente biocida, permitindo a destruição estrutural dos microrganismos [5]. Esse esquema está apresentado na Figura 1, que demonstra os agentes antimicrobianos realizando a inibição das enzimas por meio da destruição estrutural das membranas e paredes celulares, seus ácidos nucleicos e proteínas, inibindo a ação dos organismos no compósito cimentício.

Figura 1. Esquema da ação dos compósitos biocidas.



Fonte: adaptado de Qiu *et al.* (2020).

Os aditivos microbianos têm como principal função facilitar o concreto a inibir ou matar os micróbios, incluindo as bactérias, fungos e algas. Esses compostos podem ser biocidas, microbicidas, antissépticos e desinfetantes, caracterizados por sua capacidade de eliminar microrganismos, podendo ser classificados como inorgânicos e orgânicos [5]. A adição de ZnO em produtos à base de cimento pode contribuir para com a diminuição do desenvolvimento microbiano, por ser um material já usado como biocida nas mais diversas áreas [6].

Em estudo, confirma-se que 20% de óxido de zinco e 20% de brometo de sódio, em relação à massa de cimento, foram, dentre todas as amostras analisadas para argamassas com aditivos de compostos individuais, os com maiores resultados inibitórios, contabilizando 68 mg/m² e 60 mg/m² de clorofila total, respectivamente. Em argamassas com aditivos de compostos binários e terciários, obteve-se 20% óxido de zinco e 20% escória de cobre, obtendo concentrações totais de clorofila de 56 mg/m² e 10% óxido de zinco, 5% cloreto de amônio e 5% escória de cobre com 61 mg/m² de clorofila total, respectivamente. O estudo teve como principal objetivo buscar aditivos biocidas à base de cimento para controlar o crescimento de algas em canais de distribuição de água. Foram utilizadas diferentes formulações de biocidas contendo cinzas volantes classe F, sílica ativa, óxido de zinco, escória de cobre, cloreto de amônio, brometo de sódio e brometo de cetil-metil-amônio. O cimento Portland tipo I/II, areia de sílica para enchimento, relação areia/cimento de 1:2 e relação água/cimento de 0,5 foram os materiais utilizados para a moldagem dos corpos de prova [6].

Em pesquisa mais recente, compõe-se amostras com 95% de cimento Portland e 5% de pó de óxido de zinco (denominado MZ5), 90% de cimento e 10% de ZnO (MZ10), 85% e 15% (MZ15) e, por fim, 80% e 20% (MZ20). Após a preparação

dos corpos de prova, foram realizados ensaios para verificação das propriedades antimicrobianas com a utilização de cepas microbianas (*Staphylococcus aureus* ATCC 6538, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853 e *Candida albicans* ATCC 10231) obtidas em laboratório. Durante os ensaios, foi possível detectar a presença de camadas de biofilme em todos os corpos de prova para os organismos *S. aureus* e *P. aeruginosa*, enquanto para a *C. albicans* detectou-se a presença de uma cepa de levedura. Nos resultados obtidos no estudo, foi possível concluir que o crescimento planctônico na linhagem de levedura é inibido, de forma significativa, em todas as amostras, principalmente em MZ15 e MZ20, que possuíam maiores concentrações de óxido de zinco, além do desenvolvimento do biofilme ser mínimo nesses mesmos corpos de prova. Além disso, foi possível constatar um importante atraso na hidratação e endurecimento do cimento Portland, quando acrescidos o pó de ZnO. Sendo assim, os resultados obtidos demonstraram que os materiais à base de cimento podem ser melhorados em termos de eficiência antimicrobiana quando modificados com ZnO [7].

Além de ser um aditivo biocida, o óxido de zinco possui propriedades de melhoria na resistência do concreto. Em pesquisa aprofundada, houve a adição de ZnO a 2%, constatando um aumento de 20% na resistência à compressão, podendo ser utilizado para produção de concreto de alta resistência. Quando adicionado em percentuais menores, têm efeito na alteração do tempo de pega do concreto, logo, podem ser usados como aditivos retardadores, sem afetar direta e indiretamente a sua resistência [8]. Outra pesquisa aponta que, o aditivo de óxido de nano-zinco provocou a melhora nas propriedades mecânicas e físicas do compósito, pois preenche os vazios e promove uma maior impermeabilidade do concreto [9]. Verificou-se também que a adição de óxido de zinco ao concreto promoveu um ténue aumento, de 7%, relacionado à resistência à compressão. Além disso, pôde-se concluir que o ZnO atua como fotocatalisador e cria a capacidade de autolimpeza do material, possuindo boa absorção UV e deixando as propriedades do concreto inalteradas. Este estudo utilizou-se de corpos de prova de compósitos cimentícios com uma mistura de superfície com o aditivo de zinco, cimento, *filler* e água, realizando sua testagem em resistência à compressão aos 28 dias de cura [10].

Em outro estudo, foram adicionados teores em massa de 0,1% e 0,2% de óxido de zinco no cimento Portland, concluindo-se que o ZnO aumentou o tempo de pega da pasta de cimento e aumentou as idades de cura, apresentando uma melhora na resistência à compressão ao longo do tempo de cura (7 dias, 14 dias e 28 dias), apesar de, nos dias iniciais, haver uma redução (1 dia e 3 dias). Além disso, o volume cumulativo de poros teve uma diminuição e o grau de hidratação encontrou-se proporcional ao seu respectivo volume. Houve também uma redução do calor de hidratação da pasta na idade precoce, aumentando no estágio posterior; e, por último, ocorreu um retardo na hidratação precoce, ainda que obteve-se pouco efeito na hidratação posterior [11].

Em estudo, consistido em adição do óxido de zinco em compósitos cimentício, houve a avaliação da influência no seu tempo de cura e da sua resistência à compressão do material, os resultados demonstraram uma forte influência que o ZnO teve sob o cimento Portland, mesmo em baixas concentrações. As misturas com 1% de ZnO obtiveram um tempo de cura duas vezes maior quando comparadas ao de referência. Os tempos de início de pega para os teores de 5%, 10% e 15% aumentaram gradativamente conforme a quantidade de óxido incorporado, demorando, aproximadamente, oito vezes mais tempo do que o de referência, chegando a apresentar 56 horas, para o traço com 15%. Suas resistências mecânicas se apresentaram baixas aos sete dias de cura. No caso com os de maior teor, houve rompimento apenas no capeamento dos corpos de prova, sem necessidade de aplicação de força mecânica; já aos 28 dias mostraram valores maiores, porém reduzidos a 50% do valor de referência [12].

Esses fenômenos podem ser explicados devido à formação da etringita tardia. A etringita ocorre durante a hidratação do cimento, com a formação de cristais na sua matriz, e pode ser inibida se houver falhas durante essa fase, ocasionando a chamada etringita tardia, que se desenvolve em um determinado tempo após a cura do cimento, podendo gerar manifestações patológicas nas estruturas ou superfícies ao longo dos anos. Essa patologia pode desenvolver alguns problemas a longo prazo, como a expansão e fissuração, causada por tensões internas no material; a redução da resistência mecânica, devido à expansão volumétrica e a fissuração, as quais reduzem a capacidade de suporte do compósito; a degradação química, já que aumenta a porosidade do material, o que pode torná-lo mais suscetível à redução da durabilidade e a uma necessidade de reparos e substituições frequentes; e a perda de aderência no concreto armado, causada pelas fissuras, comprometendo ainda mais a estabilidade e a segurança da estrutura [13].

Ainda conforme o autor, evita-se esse fenômeno por meio da seleção adequada de materiais com baixos teores de sulfatos ou por meio da utilização de aditivos que reduzam a quantidade de sulfatos presentes nos compósitos; pelo controle da cura, usando técnicas de cura úmidas ou a aplicação de agentes de cura; com a proteção do compósito contra a exposição prolongada a sulfatos, por meio da utilização de revestimentos ou outros meios de proteção contra a água subterrânea ou demais ambientes agressivos; e por fim, implementando um rigoroso controle de qualidade durante a produção e colocação do material, minimizando a formação de etringita tardia. Isso inclui a utilização de cimentos de alta qualidade, a condução de ensaios de resistência e a garantia de que o compósito é devidamente aplicado e curado [13].

Além dos aditivos biocidas, a adição mineral a compósitos cimentícios oferece benefícios significativos, incluindo a melhoria da resistência e durabilidade do material. Materiais como cinzas volantes, sílica ativa e escória de alto-forno reagem com o cimento, formando compostos que preenchem os poros e aumentam a densidade do material, resultando em maior resistência mecânica.

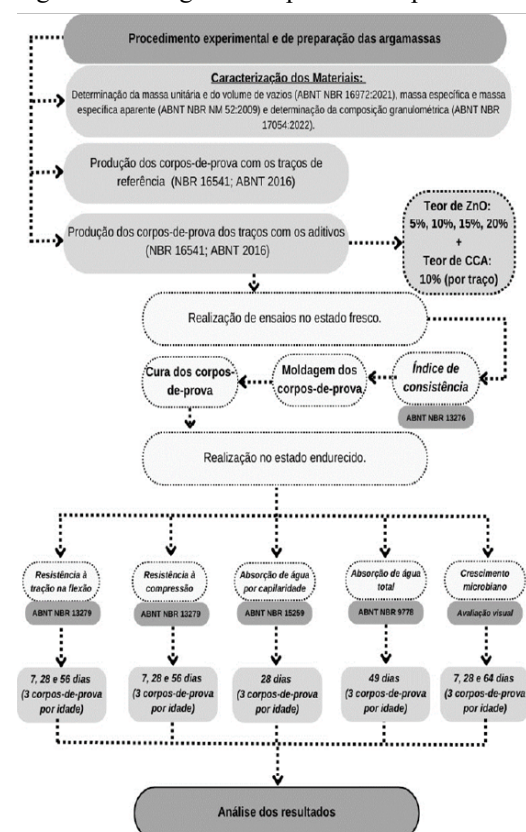
Além de que essas adições minerais também o tornam mais resistentes à penetração de substâncias agressivas, como água e produtos químicos, aumentando sua durabilidade [14]. Para tal, as cinzas de casca de arroz foram adicionadas a mistura, para que agreguem melhor desempenho aos compósitos biocidas em relação a sua resistência e absorção de água por capilaridade [15].

A partir do estudo, a adição do óxido de zinco e a compatibilização com as cinzas de casca de arroz serão avaliadas por meio de análises em suas propriedades mecânicas, realizando um comparativo com o crescimento de microrganismos em compósitos tradicionais e biocidas, além de se verificar se houve melhoria de resistência por parte dos aditivos adicionados, concomitantemente ou não.

2. Materiais e métodos

Este capítulo possui como objetivo detalhar o sequenciamento das atividades realizadas, a fim de obter os resultados almejados no presente trabalho. Dessa forma, ao decorrer deste serão apresentados os materiais e os métodos utilizados para realização dos ensaios laboratoriais. Por meio da Figura 2, é possível visualizar o fluxograma do processo experimental, elencando todos os passos realizados durante a metodologia para, por fim, chegar aos resultados.

Figura 2. Fluxograma do processo experimental.



Fonte: os autores (2023).

A realização da análise comparativa do uso de aditivos biocidas em compósitos cimentícios com o de referência se deu por meio da produção de corpos de prova, posteriormente submetidos a ensaios em seu estado fresco e em seu estado endurecido. A partir desses ensaios foi possível realizar a verificação das propriedades mecânicas dos materiais bem como a realização de uma análise da manifestação microbiana nas amostras com e sem aditivo biocida.

Para obter-se uma maior padronização e organização dos ensaios, foi necessária a determinação de parâmetros fixados, a fim de facilitar, posteriormente, a realização da análise dos resultados. Os traços das amostras foram definidos a partir dos estudos anteriormente elencados, nos quais foram encontrados 0,5 de relação aglomerante-água e de 1:3 (cimento-agregado) em massa para argamassa de revestimento. Para atingir uma consistência que apresentasse uma boa trabalhabilidade, no momento da moldagem dos corpos de prova foi necessária a adição de 1,46g (0,042%) de aditivo superplastificante no traço de referência e, por consequência, nos demais traços [7].

As variáveis controláveis têm por finalidade a análise dos diferentes retornos das variáveis de resposta. Foram definidas variáveis controláveis para o estudo em questão, sendo os teores de adição óxido de zinco e de cinza de casca de arroz adicionados às misturas. Esses traços foram baseados nos estudos citados e, a partir da análise desses traços, os componentes para o teor de cinzas de casca de arroz e óxido de zinco foram definidos como as seguintes variáveis de adição:

- a) 0% ZnO + 0% CCA (compósito cimentício referência);
- b) 5% ZnO + 10% CCA;
- c) 10% ZnO + 10% CCA;
- d) 15% ZnO + 10% CCA;
- e) 20% ZnO + 10% CCA.

2.1 Variáveis de resposta

Os resultados das variáveis de resposta são provenientes dos ensaios laboratoriais realizados, sendo eles: resistência à compressão, resistência à tração na flexão, absorção de água total, absorção de água por capilaridade e análise visual do crescimento de microrganismos nas amostras.

2.2 Limitações

Visto a impossibilidade de outra forma de análise do crescimento microbiano, devido à falta de recursos, o trabalho restringiu-se à avaliação do uso de óxido de zinco (ZnO) como aditivo biocida. E, dessa forma, limitou-se a verificação de forma visual, com o intuito avaliar as propriedades biocidas dos compósitos cimentícios. Além disso, a etapa de moldagem

revelou-se inviável, devida à baixa trabalhabilidade do material. Por consequência, foi realizada a inclusão de superplastificante, desde o traço de referência, e dessa maneira, aplicado nas demais amostras contendo ZnO.

2.3 Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa foram adquiridos no Laboratório de Materiais de Construção e no Laboratório de Tecnologia Construtiva (LBTEC) da Universidade de Caxias do Sul (UCS), sendo eles: cimento CP V-ARI RS, agregado miúdo de areia fina, água, aditivos e adições de óxido de zinco [16] e cinzas de casca de arroz, além do superplastificante Sika ViscoCrete® 6090 HW. A Tabela 1 apresenta as proporções utilizadas para a moldagem dos materiais, conforme seus traços.

Tabela 1. Proporções utilizadas e codificações dos traços.

Cimento (kg)	Areia (kg)	Aditivo Biocida (kg)	Aditivo Mineral (kg)	Superplastificante (kg)
0,45	1,35	-	-	0,000189
0,45	1,35	0,0225	0,045	0,000189
0,45	1,35	0,045	0,045	0,000189
0,45	1,35	0,0675	0,045	0,000189
0,45	1,35	0,09	0,045	0,000189

Fonte: os autores (2023).

As proporções utilizadas estão na Tabela 2, contendo os traços definidos para o cimento, a areia, a relação água-cimento e os aditivos, ZnO e CCA. Para o superplastificante, foi utilizado um teor de 0,042% em massa de cimento, em todos os traços.

Tabela 2. Traços definidos.

	Cimento	Areia	A/C	ZnO	CCA	Sup.
				0%	0%	0,042%
				5%	10%	0,042%
Traços	1	3	0,5	10%	10%	0,042%
				15%	10%	0,042%
				20%	10%	0,042%

Fonte: os autores (2023).

2.4 Métodos de ensaio

O presente estudo realizou ensaios das propriedades dos compósitos cimentícios no estado fresco, de índice de consistência, e no estado endurecido, de resistência à tração na flexão, resistência à compressão e absorção de água por capilaridade parcial e total. Além disso, no estado endurecido, foi realizada análise visual das propriedades biocidas dos corpos de prova.

Os ensaios no estado fresco para caracterização dos compósitos cimentícios de referência e dos materiais com aditivo biocida se deram por meio do índice de consistência. Para a realização dos ensaios de índice de consistência foi utilizada a norma ABNT NBR 13276 [17].

Também foram realizados os ensaios de resistência à tração na flexão, de resistência à compressão, da análise visual das propriedades biocidas dos materiais e absorção de água por capilaridade para todas as amostragens, a fim de realizar a caracterização dos corpos de prova. A idade dos corpos de prova para os ensaios de resistência foram de 7, 28 e 56 dias, enquanto os demais ensaios foram com a idade mínima de 28 dias para absorção por capilaridade parcial e 49 dias para a absorção total, realizando três amostras por traço. Para os ensaios de resistência à tração na flexão e compressão foi tomada como base a normativa ABNT NBR 13279 [18]. Para o ensaio de absorção de água por capilaridade foi utilizada a norma de referência para o assunto, a ABNT NBR 15259 [19], e para o ensaio de absorção de água total, a normativa ABNT NBR 9778 [20]. O crescimento microbiano foi avaliado por meio de uma análise visual, com o intuito de detectar movimentações relacionadas a proliferações de microrganismos, principalmente fungos e bolores, por serem visíveis a olho nu. Foram feitas imagens dos corpos de prova aos 7, 28 e 64 dias de cura, comparando-as, a fim de detectar alterações nos materiais expostos às intempéries.

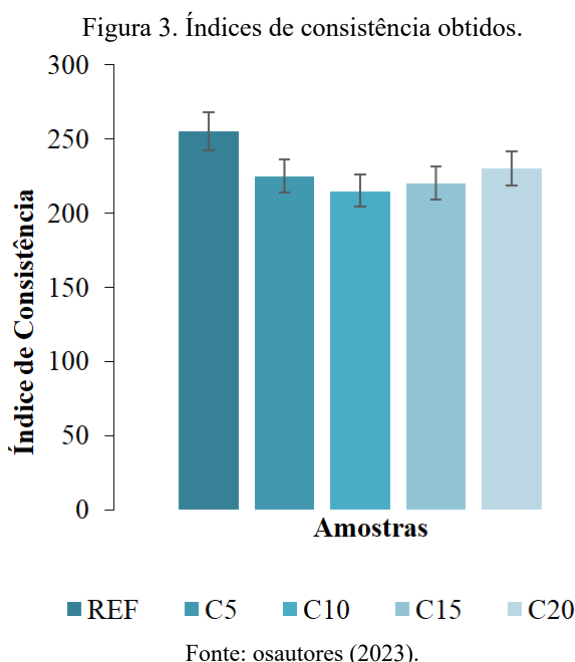
3. Resultados e discussão

Neste capítulo, estão apresentados os resultados obtidos quanto à avaliação das propriedades dos materiais produzidas nos ensaios realizados no estado fresco e no estado endurecido, nas suas diferentes composições.

3.1 Propriedades no estado fresco

3.1.1 Trabalhabilidade

A Figura 3 ilustra os índices de consistência obtidos durante a execução do ensaio. Os desvios padrão obtidos foram de 8,06; 7,21; 9,04; 5,66 e 7,73, respectivamente.



Os dados evidenciam uma redução nos índices de consistência e, conseqüentemente, na trabalhabilidade dos compósitos biocidas C5, C10, C15 e C20. Essa redução ocorre devido à alta concentração de finos na mistura, exigindo a utilização de aditivos, como o superplastificante, para evitar o aumento da relação água-cimento. A adição das cinzas de casca de arroz e do óxido de zinco à mistura contribui para o aumento da viscosidade, diminuição da fluidez e, conseqüentemente, para a redução da trabalhabilidade dos compósitos [21]. Nos testes realizados, verificou-se que quanto maior a adição das cinzas de casca de arroz e do óxido de zinco, maiores foram as dificuldades para moldar os corpos de prova, entretanto, após a adição do superplastificante, os índices de consistência para todos os traços estudados apresentaram melhor trabalhabilidade.

3.2 Propriedades no estado endurecido

3.2.1 Resistência mecânica

Os dados referentes à resistência mecânica de tração na flexão foram apresentados nas Figuras 4 e 5, representando os ensaios realizados aos 7, 28 e 56 dias de cura dos corpos de prova. O gráfico de resistência à tração *versus* teor de ZnO e o gráfico de resistência à tração *versus* tempo de cura são exibidos nessas figuras. Os desvios padrão encontrados foram de 0,38, 0,087, 0,075, 0,136 e 0,132 para as amostras REF, C5, C10, C15 e C20, respectivamente. O mesmo padrão é seguido para os ensaios de compressão, cujos resultados são apresentados nas Figuras 6 e 7, em que seu desvio padrão para a amostra de referência foi de 0,612, enquanto para os corpos de prova com teores de 5%, 10%, 15% e 20% de ZnO foram, respectivamente, de 0,162, 0,05, 0,423 e 0,382.

Figura 4. Ensaio de resistência à tração na flexão *versus* teor de ZnO.

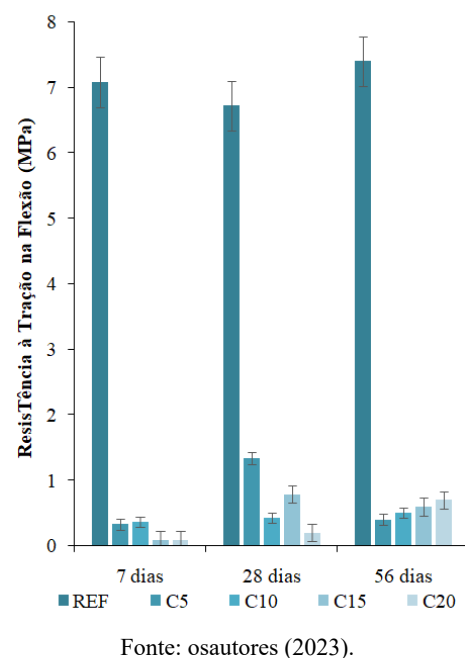
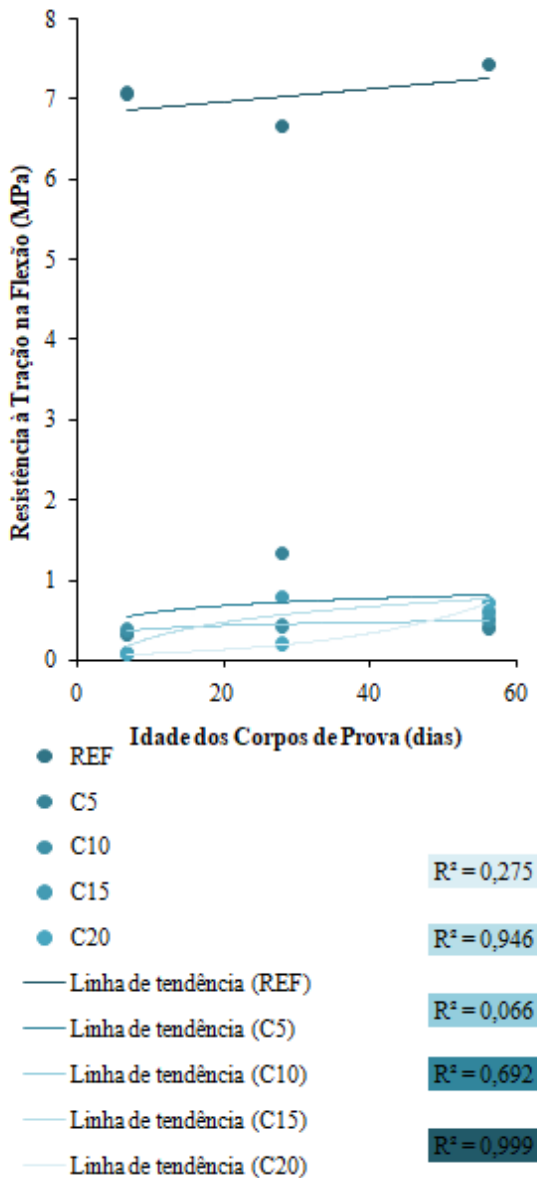


Figura 5. Ensaio de resistência à tração na flexão *versus* tempo de cura, em dias.



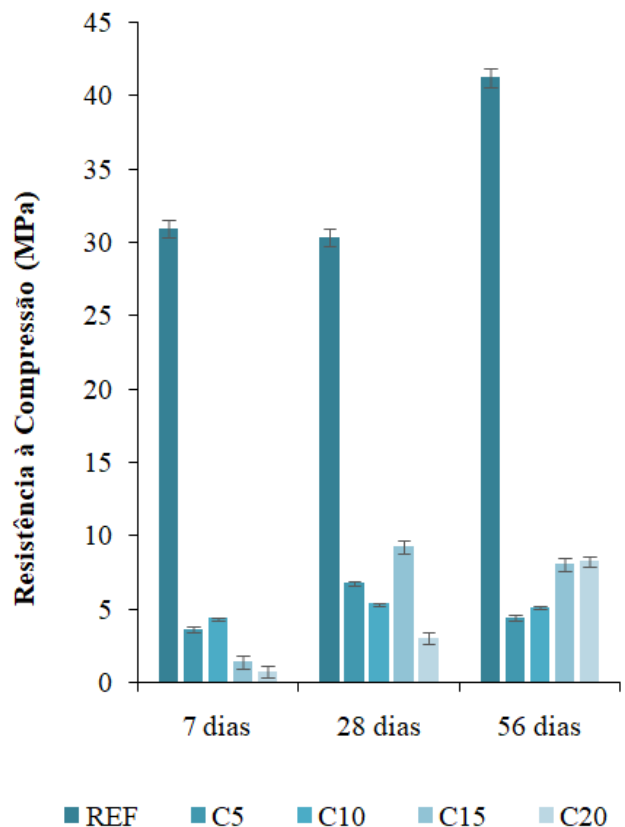
Fonte: osautores (2023).

Para um melhor entendimento do comportamento das amostras estudadas, foram avaliadas as resistências entre o traço de referência, REF, e os demais traços contendo os aditivos C5, C10, C15 e C20. No ensaio de resistência à tração na flexão, na idade de sete dias, à medida que aumentava a quantidade de óxido contida na mistura, observou-se uma perda de resistência, causada, possivelmente, pela umidade que se apresentou devido ao tempo de cura insuficiente e pela porosidade das amostras. Isso se dá devido à interação entre a água e o óxido de zinco, o que corrobora para sua perda de resistência, pela má formação da etringita. Os corpos de prova com 5% e 10% de ZnO romperam com maior facilidade, além disso, os que possuíam 15% e 20% ainda mostraram presença de umidade e, em uma das três amostras,

houve o rompimento aplicando-se apenas a força do manuseio do material para a colocação na prensa – associando-se a outro estudo, que demonstrou uma perda de até 50% na resistência na idade dos sete dias[12].

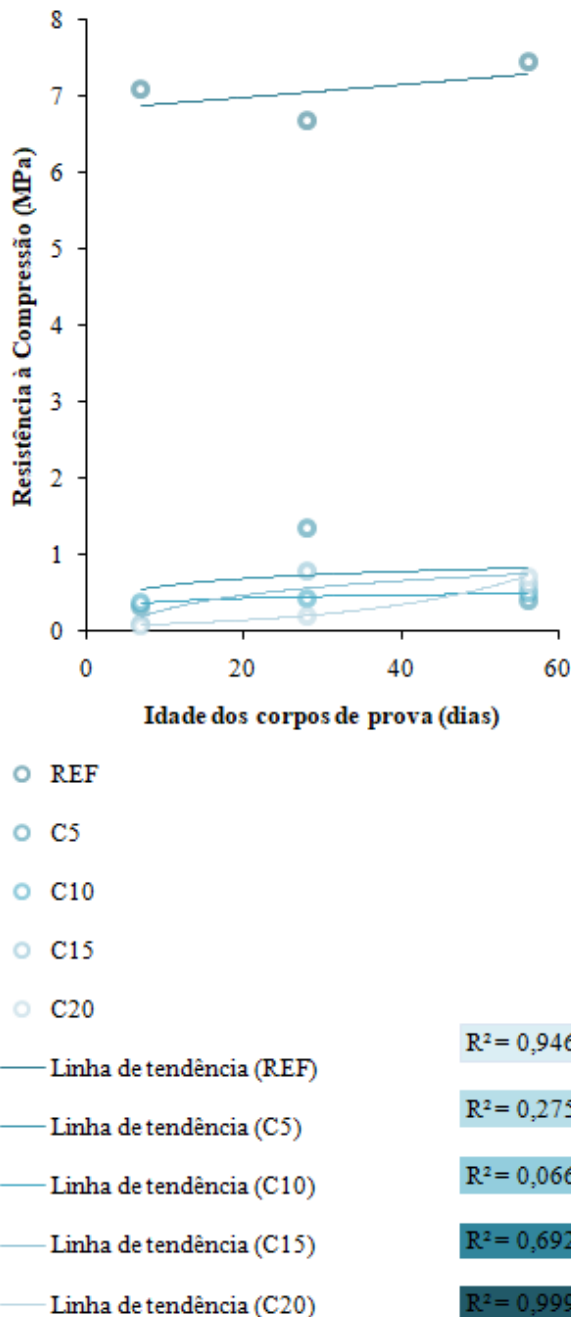
Aos 28 dias, foi possível observar uma tênue melhora na resistência dessas amostras, que pode ser explicada pelo maior tempo de cura a que esses materiais foram submetidos [12]. Aos 56 dias, também se observou uma melhora nas resistências quanto à tração na flexão e compressão, devido ao aumento do tempo de cura. Cada um desses resultados pode ser explicado pela cura insuficiente do material, devida à deficiência de hidratação que ocorreu durante as reações.

Figura 6. Ensaio de resistência à compressão *versus* teor de ZnO.



Fonte: os autores (2023).

Figura 7. Ensaio de resistência à compressão versus tempo de cura.



Fonte: osautores (2023).

Com os resultados de resistência mecânica à tração na flexão foi possível constatar uma diminuição de aproximadamente 95%, 94%, 98% e 99% aos 7 dias, 80%, 93%, 88% e 97% aos 28 dias e 95%, 93%, 92% e 91% aos 56 dias, para os traços C5, C10, C15 e C20, respectivamente. Assim como nos resultados de resistência à compressão, em que houve uma queda expressiva de resistência, aproximadamente, 88%, 86%, 96% e 98% aos 7 dias, 79%, 82%, 70% e 90% aos 28 dias e, 89%, 88%, 81% e 80% aos 56 dias, para os traços C5, C10, C15 e C20, respectivamente. Com

esses dados, tanto para tração na flexão quanto para compressão, pôde-se concluir que houve uma alta perda de resistência quando comparado ao traço de referência devido à má formação da etringita, causada pela deficiência na hidratação do cimento. Isso é comprovado pelo aumento gradual da resistência ao longo dos dias, uma vez que foi concedido o tempo necessário para o adequado período de cura do corpo de prova.

Após o desmolde dos corpos de prova, nas 48 horas, já foi possível observar algumas alterações nos componentes que continham teores de óxido de zinco, visto que demonstraram aspecto de umidade, conforme apresentado na Figura 8, em que mostra o mesmo corpo de prova com teor de 20% aos 7 dias e aos 28 dias, indicando um retardo no seu processo de cura, que melhorou ao longo do tempo. Evidenciando que o zinco na forma de óxido corrobora para o atraso na pega desses materiais, já que, nas amostras que continham 15% de ZnO, apresentou-se um tempo de cura total de 56h, enquanto o traço de referência, demorou 6:50 h [12].

Figura 8. Deficiência no tempo de cura dos corpos de prova com 20% de ZnO.



Fonte: os autores (2023).

Assim, como explicado anteriormente, a deficiência da hidratação do composto é um problema que pode ter afetado o processo de cristalização dos grãos do cimento e, por consequência, a devida cura dos corpos de prova. A causa provável desse fenômeno é a reação entre o óxido de zinco e a água, formando o hidróxido de zinco ($Zn(OH)_2 \rightarrow H_2O + ZnO$),

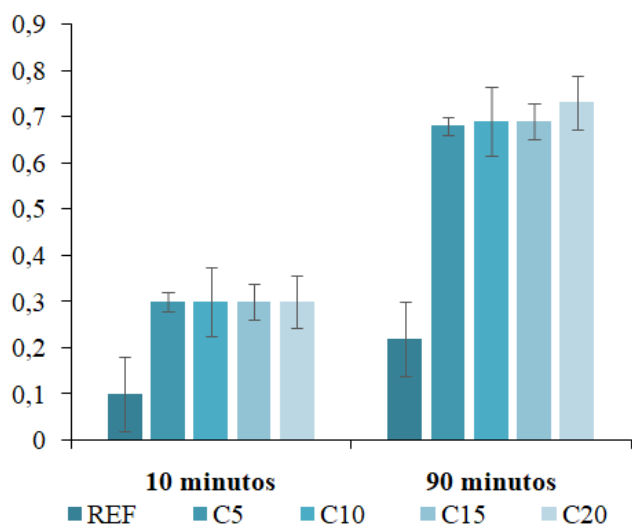
responsável pela atividade antimicrobiana [22]. Em suma, ao entrar em contato com a água, o óxido de zinco reage, sofrendo uma dissolução química, e essa reação impossibilita a hidratação imediata do cimento, o que gera a formação da etringita tardia, ocasionando as patologias anteriormente citadas[23].

Além disso, a alta concentração de finos na mistura pode ter contribuído para a fragilidade dos corpos de prova, o que pode ter agravado o problema. É importante realizar testes adicionais para entender melhor as causas do esfrelamento e encontrar soluções para evitá-lo no futuro.

3.2.2 Absorção de água por capilaridade

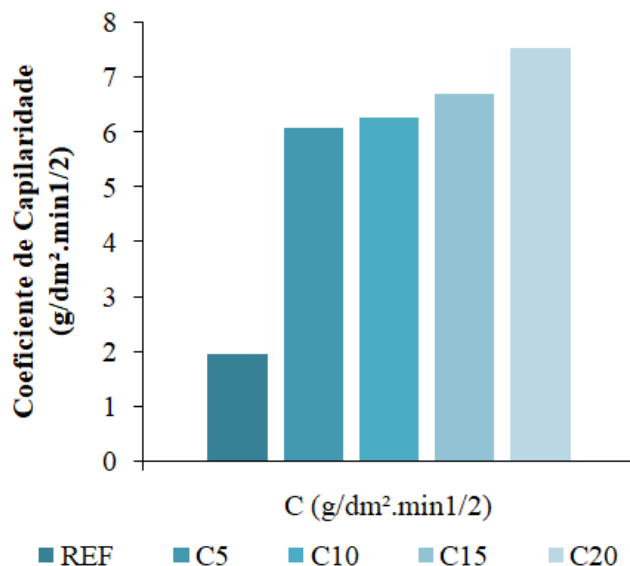
Os resultados apresentados para a absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade estão expressos nas Figuras 9 e 10. Os desvios padrão encontrados para as amostras de referência e com os teores de óxido de zinco, em ordem crescente, respectivamente, foram de 0,08, 0,02, 0,075, 0,04 e 0,057.

Figura 9. Absorção de água por capilaridade.



Fonte: os autores (2023).

Figura 10. Coeficiente de capilaridade.



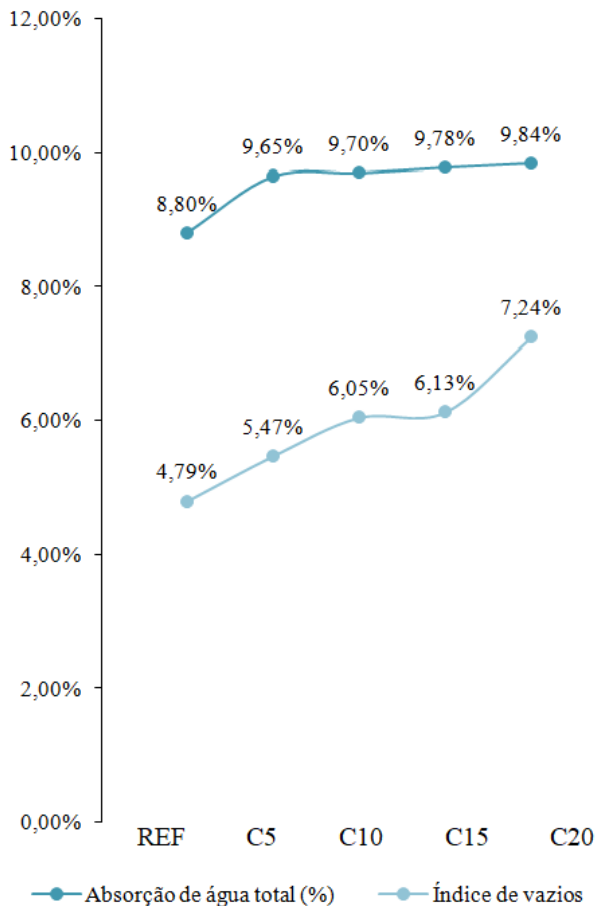
Fonte: os autores (2023).

Para os traços de C5, C10, C15 e C20 foi observado aumento na absorção de água por capilaridade de 3,10, 3,20, 3,40 e 3,80 vezes maior, respectivamente, quando comparados ao de referência. Esses dados mostram a influência que o óxido de zinco tem sob os resultados, visto que, quando houve a reação entre o ZnO e a água, aumentou o número de vazios e, por consequência, aumentou a sua porosidade, majorando o percentual de absorção.

3.2.3 Absorção de água total

Os resultados apresentados para a absorção de água total e índice de vazios estão expressos na Figura 11.

Figura 11. Absorção de água total e índice de vazios.



Fonte: os autores (2023).

Para os traços C5, C10, C15 e C20 foi observado um leve aumento na absorção de água total e no índice de vazios presentes nas amostras quando comparadas a de referência. Esses dados vêm ao encontro com os resultados já constatados, pois esse aumento do número de vazios conforme há a incorporação de óxido de zinco à mistura elucida a reação que ocorre entre o óxido de zinco e a água, permitindo um acréscimo no número de poros dos corpos de prova e, conseqüentemente, proporcionando uma maior absorção de água para o preenchimento desses vazios.

3.2.4 Crescimento microbiano

As imagens apresentadas nas Figuras 12,13,14, 15 e 16 demonstram os corpos de prova nas idades de 7, 28 e 64 dias, respectivamente, em ordem crescente de adição de ZnO.

Figura 12. Corpos de prova aos 7 dias.



Fonte: os autores (2023).

Figura 13. Corpos de prova aos 7 dias.



Fonte: os autores (2023).

Figura 14. Corpos de prova aos 28 dias.



Fonte: os autores (2023).

Figura 15. Corpos de prova aos 28 dias.



Fonte: os autores (2023).

Figura 16. Corpos de prova aos 64 dias.



Fonte: os autores (2023).

Com as Figuras 12,13,14, 15 e 16, é possível observar que os corpos de prova que possuíam teores de óxido de zinco aos 7 dias se mostraram úmidos superficialmente; após maior tempo de cura, ou seja, aos 28 e 64 dias, desenvolveram melhora no percentual de umidade. O crescimento microbiano mostrou pouca alteração a olho nu mesmo no traço de referência, devido ao curto tempo de exposição de 64 dias. Contudo, os corpos de prova com o aditivo, por serem mais porosos e, conseqüentemente, terem um ambiente mais propício para proliferação de fungos e bactérias, deveriam apresentar um crescimento mais acelerado desses microrganismos, caso não houvesse aditivos biocidas presentes em sua composição. Tal observação demonstra que há um ponto positivo para a análise, visto que não apresentaram nenhum crescimento visível no tempo estudado.

Conclusões

No estado fresco, o composto apresentou índices de consistência dentro do preconizado pela NBR 13276 [17]. Já no estado endurecido, verificou-se um retardo no processo de hidratação dos compósitos, sendo necessário maior tempo de cura desses materiais. Por isso, tratando-se da resistência à compressão dos traços com adição de óxido de zinco e cinzas de casca de arroz, obteve-se uma queda significativa na sua resistência ao comparar com a referência. Da mesma forma, no que diz respeito à resistência à tração na flexão, também se apresentou uma perda de resistência. Logo, formou-se um compósito cimentício altamente frágil, com a possibilidade de apresentar manifestações patológicas futuras, tornando-o atualmente inviável para implementação no mercado. Além disso, constatou-se que, dado o tempo de exposição do corpo de prova ao ambiente, de aproximadamente nove semanas, mediante a análise visual não foi possível detectar nenhum crescimento microbiano importante nos traços desenvolvidos, já que os corpos de prova não apresentaram colônias de microrganismos visíveis a olho nu.

Independentemente dos resultados insatisfatórios, o estudo mostrou a necessidade de se aprofundar no assunto sobre aditivos biocidas, visando sua aplicação no mercado, principalmente de construção civil; para que, mais à frente, seja possível a construção de estruturas com maior durabilidade e resistência à exposição a ambientes agressivos.

Referências

- [1] Lisboa, E. S. *et al.* (2017). *Materiais de Construção: Concreto e Argamassa*. Local de publicação: LTC.
- [2] Carasek, Helena. (2017). *Patologia das Argamassas de Revestimento*. São Paulo: Ibracon. <https://ecivilufes.files.wordpress.com/2011/03/patologias-em-argamassa.pdf>.
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). *NBR 15575-1. Edificações Habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos Gerais*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [4] Vaquero, J. M. *et al.* (2016). Development and experimental validation of an overlay mortar with biocide activity. *Cement and Concrete Composites*, 74(9), 11. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095894651630508X?casa_token=WMcZJL20doAAAAA:YgE9xMAOZsR3fA-3aHsxihq0jAOhSabB7q2VP9WfrhH9apvRUyrgwcFyRwfm-DIAUd1Xs8vGW9I9A.
- [5] Qiu, L. *et al.* (2020). Antimicrobial concrete for smart and durable infrastructures: a review. *Construction and Building Materials*, 260(1). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820324612>.
- [6] Alum, A. *et al.* (2008). Cement-based biocide coatings for controlling algal growth in water distribution canals, *Cement and Concrete Composites*, 30(9), 8. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946508000693>.
- [7] Voicu, G., Tiuca, G., Badanoiu, A. & Holban, A. (2022). Nano and mesoscopic SiO₂ and ZnO powders to modulate hydration, hardening and antibacterial properties of Portland cements. *Journal of Building Engineering*, 57(1), 104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2022.104862>.
- [8] Anandaraj, S. *et al.* (2022). Effects of using white flour, zinc oxide and zinc ash as an admixture in mortar and concrete. *Materials Today: Proceedings*, 52(1), 5. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.447>.
- [9] Khalaf, M. A. *et al.* (2021). Effect of nano zinc oxide and silica on mechanical, fluid transport and radiation attenuation properties of steel furnace slag heavyweight concrete. *Construction And Building Materials*. 274(8). <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121785>.



- [10] Visali, C., Priya, A. K. & Dharmaraj, R. (2021). Utilização de ecofriendly self-cleaning concrete using zinc oxide and polypropylene fibre. *Materials Today: Proceedings*, 37(2), 4. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.309>.
- [11] Li, X., Li, J., Lu, Z. & Chen, J. (2021). Properties and hydration mechanism of cement pastes in presence of nano-ZnO. *Construction And Building Materials*, 289(1), 123. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuilmat.2021.123080>.
- [12] Langaro, E. A. *et al.* (2010). Influência do óxido de zinco nos tempos de pega e nas resistências à compressão do cimento Portland e do cimento aluminoso. In *Anais do XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído* 1(1), 7. https://silo.tips/queue/influencia-do-oxido-de-zinco-nos-tempos-de-pega-e-nas-resistencias-a-compressao?&queue_id=-1&v=1681672284&u=MjgwNDozMGM6M TczMjoyZ-jAwOjk4MzA6YzZcwOjhmOWM6ODg4OQ==.
- [13] Poupelloz, E., Gauffinet, S. & Nonat, A. (2020). Study of nucleation and growth processes of ettringite in diluted conditions. *Cement and Concrete Research*, 127(1), 10. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884619306726>.
- [14] Hoppe Filho, J. *et al.* (2017). Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. *Revista Matéria*, 22(3), 5. Rio de Janeiro. <https://www.scielo.br/j/rmat/a/sYkhMxmJKjxHQB5FfvdXJLk/abstract/?lang=pt>.
- [15] Bezerra, I. M. T. *et al.* (2011). Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(1), 6. <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/xBdfQfDCZTTpBgSt9yMvdD/?lang=pt&format=pdf#:~:text=A%20cinza%20produzida%20pela%20queima,utilizada%20tamb%C3%A9m%20como%20material%20pozol%C3%A2nico>.
- [16] Basile Química. (2017, 6 de dezembro). *Óxido de zinco 99%*. <https://www.basilequimica.com.br/produtos/oxido-de-zinco-99/>.
- [17] Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). *NBR 13276. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [18] Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *NBR 13279. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [19] Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *NBR 15259. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [20] Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *NBR 9778. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [21] Kawabata, C. Y, Savastano Junior, H. & Sousa-Coutinho, J. (2012). Rice husk derived waste materials as partial cement replacement in lightweight concrete. *Ciência e Agrotecnologia*, 36(5), 11. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-70542012000500010>.
- [22] Atkins, P., Jones, L. & Laverman, L. (2018). *Princípios da Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente*. Oxford: Bookman.
- [23] Liu, S., Ouyang, J. & Ren, J. (2020). Mechanism of calcination modification of phosphogypsum and its effect on the hydration properties of phosphogypsum-based supersulfated cement. *Construction and Building Materials*, 243(1), 12.