XV SBTA Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas
Porto Alegre/RS - 11 a 13 de junho de 2025

IMPACTO DA COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS EM CONDIÇÕES DE ALTA TEMPERATURA

Impact of mortar composition under high temperature conditions

LETÍCIA MATIAS MARTINS[1], JOSÉ MARIA FRANCO DE CARVALHO[2], THAÍS MAYRA DE OLIVEIRA[3], JÚLIA CASTRO MENDES[4]

[1]M.Sc., Universidade Federal de Ouro Preto/UFOP, leticia.mm@aluno.ufop.edu.br
[2]Prof. Dr., Universidade Federal de Viçosa/UFV, josemaria.carvalho@ufv.br
[3]Profª. Drª, Universidade Federal de Juiz de Fora/UFJF, thais.mayra@ufjf.br
[4]Profª. Drª, Universidade Federal de Juiz de Fora/UFJF, juliacastro.mendes@ufjf.br

RESUMO

Este estudo investiga os fatores que influenciam o comportamento das argamassas (sem especificação do tipo) em altas temperaturas por meio de uma revisão sistemática da literatura. Foram analisados artigos publicados nos últimos 10 anos, utilizando a base de dados Scopus. A maior parte das pesquisas concentrou-se nos efeitos de nanotubos de carbono, materiais cimentícios suplementares, fibras e materiais de mudança de fase nas propriedades mecânicas residuais das argamassas após a exposição a altas temperaturas. A pesquisa destaca a importância de compreender os processos químicos e físicos que ocorrem em compósitos à base de cimento para o desenvolvimento de estratégias de resistência ao fogo. Assim, é enfatizada a necessidade de continuar explorando o comportamento de argamassas e aditivos inovadores, visando aprimorar a segurança das estruturas em situações de incêndio.

Palavras-chave: Altas temperaturas. Argamassas. Fibras. Materiais cimenticios suplementares. Nanotubos de carbono.

ABSTRACT

This study investigates the factors that influence the behavior of mortars (without specifying the type) at high temperatures through a systematic literature review. Articles published in the last 10 years were analyzed using the Scopus database. Most of the research focused on the effects of carbon nanotubes, supplementary cementitious materials, fibers and phase change materials on the residual mechanical properties of mortars after exposure to high temperatures. The research highlights the importance of understanding the chemical and physical processes that occur in cement-based composites for the development of fire resistance strategies. Thus, it emphasizes the need to continue exploring the behavior of innovative mortars and additives, aiming to improve the safety of structures in fire situations.

Key-words: High temperatures. Mortars. Fibers. supplementary cementitious materials. Carbon nanotubes.

Como citar:
MARTINS, L. M.; CARVALHO, J. M. F.; OLIVEIRA, T. M.; MENDES, J. C. Impacto da composição das argamassas em condições de alta temperatura. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2025, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2025.

INTRODUÇÃO

A argamassa de revestimento é um dos materiais mais utilizados em sistemas construtivos, desempenhando um papel fundamental na proteção e durabilidade das estruturas. Diferentemente das argamassas tradicionais, as não convencionais têm ganhado destaque devido à incorporação de materiais alternativos, como aglomerantes à base de resíduos, agregados reciclados e adições minerais inovadoras, que conferem melhorias significativas às propriedades do material [1].

A proteção térmica de elementos estruturais é um aspecto crucial para garantir a segurança de edificações em situações de incêndio. Essa proteção pode ser alcançada por meio de sistemas ativos, como extintores e sprinklers, que atuam diretamente no controle das chamas [2, 3], e sistemas passivos (*Passive Fire Protection* - PFP), que visam retardar a propagação do fogo e manter a integridade estrutural, proporcionando tempo adicional para evacuação e combate ao incêndio [4, 5]. Dentre os materiais utilizados em PFP, destacam-se a lã de rocha, a perlita, as tintas intumescentes e as argamassas de cimento [6]. As argamassas se mostram particularmente eficazes, pois, além de serem inertes, absorvem parte do calor gerado, ao contrário de outros materiais que podem liberar gases tóxicos [7].

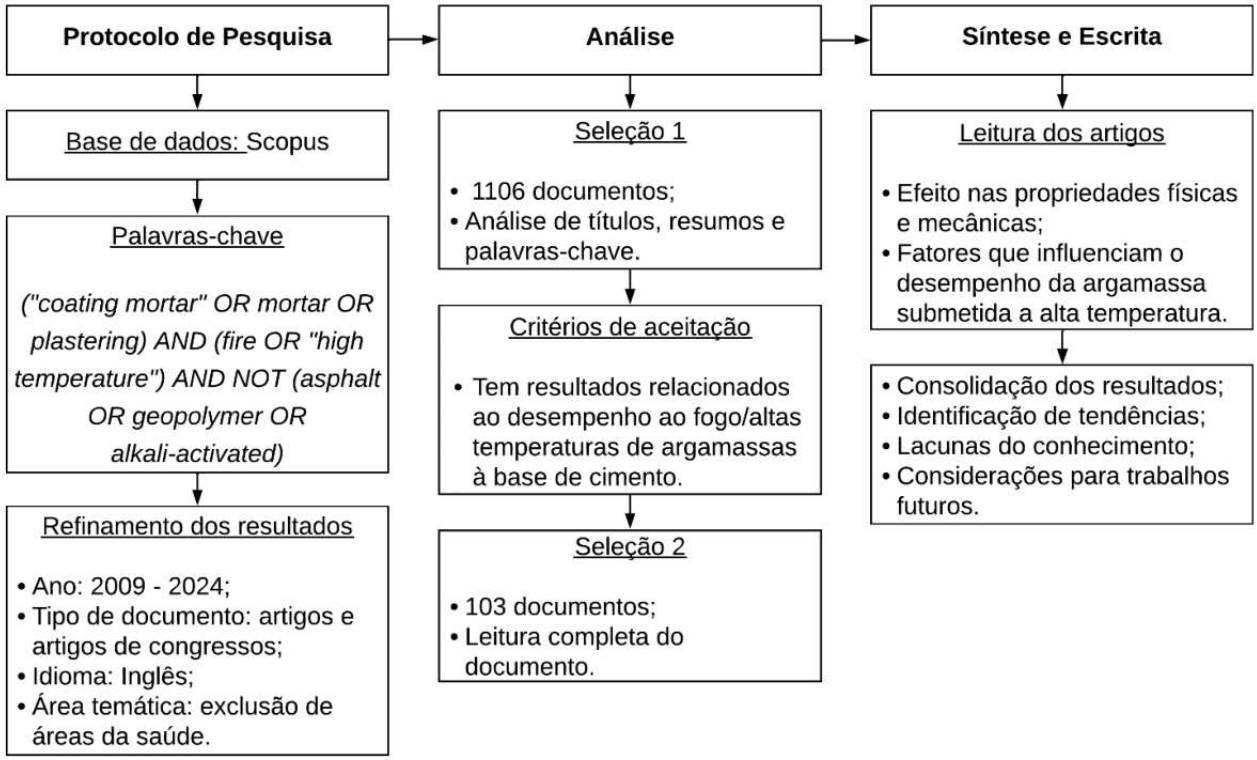
Alguns estudos, como o conduzido por Souza *et al.* [8], demonstram a eficácia das argamassas de revestimento como PFP. Em simulação de incêndio, paredes com 25 mm de argamassa atingiram 132,9 °C na face externa, enquanto as sem revestimento chegaram a 247,5 °C, evidenciando a proteção térmica do revestimento [8]. Esses resultados reforçam o potencial das argamassas não apenas na proteção de edificações convencionais, mas também como reforço na proteção de estruturas críticas, como plataformas, túneis e instalações industriais.

Neste contexto, esta pesquisa busca contribuir para o avanço do conhecimento sobre o comportamento de argamassas em altas temperaturas, destacando sua relevância tanto para a comunidade científica, quanto para profissionais da construção civil. Ao explorar o uso de argamassas como PFP, o estudo visa ampliar sua aplicação em cenários que demandam maior segurança contra incêndios, protegendo vidas humanas e patrimônios históricos e culturais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Esta revisão utilizou o método *Systematic Search Flow* de Ferenhof e Fernandes [9], que envolve quatro etapas: definição do protocolo de pesquisa, análise das fontes, síntese dos dados e escrita do artigo. A Figura 1 detalha a metodologia aplicada.

Figura 1 – Fluxograma das etapas de revisão.



Fonte: Os autores (2025).

A pesquisa utilizou os termos *("coating mortar" OR mortar OR plastering) AND (fire OR "high temperature") AND NOT (asphalt OR geopolymer OR alkali-activated).* A busca foi feita nos títulos, palavras-chave e resumos de artigos na base Scopus, limitada a publicações em inglês entre 2009 e 2024, excluindo áreas da saúde. Foram considerados apenas artigos de revistas e artigos de congressos, descartando revisões, para focar em fontes primárias.

Inicialmente, 1106 artigos atenderam aos critérios. Após a exclusão daqueles que não abordavam o desempenho de argamassas de cimento sob altas temperaturas ou incêndio, restaram 103 para análise. Esses estudos investigaram alterações físicas e químicas, propriedades mecânicas e fatores que influenciam o comportamento desses materiais em condições extremas.

A seleção foi limitada pelos termos e critérios adotados, sem avaliação de mérito científico ou citações. Além disso, não houve análise crítica dos métodos, partindo do pressuposto de que os procedimentos foram conduzidos de forma ética e imparcial.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas seções seguintes, discute-se o potencial de aplicação dos materiais inovadores encontrados, como nanotubos de carbono, materiais de mudança de fase, fibras e materiais cimentícios suplementares, e seu impacto no desempenho de argamassas à base de cimento sob condições de altas temperaturas.

NANOTUBOS DE CARBONO (NTCS)

Os nanotubos de carbono (NTCs) são estruturas cilíndricas de grafeno, descobertas na década de 1990 [10]. A adição de nanomateriais à base de carbono, como nanotubos de carbono de parede simples (NTCPS), nanotubos de carbono de paredes múltiplas (NTCPM) e nanopartículas de negro de fumo (NNF), pode melhorar as propriedades de materiais cimentícios [11]. Quando bem dispersos na matriz cimentícia, os NTCs reduzem a retração, aumentam a resistência mecânica e melhoram a durabilidade contra corrosão [12, 13].

Segundo Nalon *et al.* [11], o comportamento de NTCPM e NNF a 500 °C é semelhante ao das fibras de polipropileno a 170 °C, conferindo aos compósitos com NTCs desempenho superior em altas temperaturas. Contudo, há relativamente poucos estudos realizados sobre o desempenho de argamassas contendo NTCs em condições de incêndio ou altas temperaturas. A Tabela 1 resume os efeitos dos nanotubos de carbono (NTCs) nas propriedades de argamassas (não necessariamente de revestimento) em temperaturas elevadas.

Tabela 1 - Resumo das pesquisas realizadas sobre o efeito dos nanotubos de carbono (NTCs) nas propriedades de argamassas em temperaturas elevadas.

Aspecto	Descrição
Benefícios	Redução da retração, aumento da resistência mecânica, maior durabilidade contra corrosão e melhor desempenho em condições de altas temperaturas [12, 13].
Temperaturas Críticas	Até 600°C: A estrutura original é destruída, mas forma uma nova rede que preenche fissuras [14]. Até 800°C: Resultados promissores observados [13, 15]. 900°C: Falha completa dos NTCs [14].
Melhorias Estruturais	Preenchem os poros a 150°C [16], reduzem os poros no gel C-S-H [17] e criam locais de nucleação, acelerando a hidratação [13].
Concentração Ideal	3% NNF e 0,4% NTCPM proporcionam o melhor desempenho entre 200°C e 600°C [11].
Problemas com Excesso	Menor trabalhabilidade da matriz, má dispersão dos nanomateriais, baixa adesão à matriz e formação de zonas de defeitos [11].
Lacunas de Pesquisa	Necessidade de estudos com períodos de cura superiores a 28 dias e análises mais aprofundadas das propriedades térmicas.

Fonte: Os autores (2025).

Em resumo, para garantir o desempenho dos nanotubos de carbono (NTCs), é essencial manter concentrações adequadas, já que quantidades excessivas podem resultar em má dispersão, baixa adesão à matriz cimentícia e atraso da formação de produtos de hidratação [16, 11]. Esses achados destacam o potencial dos nanomateriais em aprimorar o desempenho de compósitos de cimento, desde que utilizados dentro de faixas de concentração otimizadas. Entre as principais lacunas da literatura, destacam-se a necessidade de ensaios com tempos de cura superiores a 28 dias e uma investigação mais detalhada sobre o impacto da proporção e do tipo de NTCs nas propriedades térmicas, como condutividade térmica e calor específico.

FIBRAS

A incorporação de fibras de polipropileno (PP) em argamassas tem se mostrado eficaz para melhorar a resistência ao fogo e reduzir a propagação de fissuras [16, 18]. Ao atingir seu ponto

de fusão, as fibras de PP derretem, criando poros capilares que aliviam a pressão interna, minimizando o risco de lascamento [19, 20]. No entanto, em temperaturas acima de 400-450°C, a resistência residual do material pode ser comprometida [19, 21].

Ezziane *et al.* [22] indicam que a partir de 500 °C, compósitos com fibras de PP apresentam resistência à flexão inferior à de materiais sem fibras, devido à fusão e ignição das fibras, que ocorrem entre 150-170 °C e 350-593 °C, respectivamente [19, 22]. Uma solução proposta por Irshidat *et al.* [16] é o uso de sistemas híbridos, combinando fibras de PP com outras, como as de basalto. Yao *et al.* [23] observaram que argamassas com fibras de basalto e PP mantiveram 50% de sua resistência à compressão após exposição a 800 °C. Já Yildirim *et al.* [24] relataram que argamassas apenas com fibras de basalto preservaram 58,1% de sua resistência à compressão após aquecimento a 600 °C, superando a argamassa de referência (46,9%).

Fibras de aço e de álcool polivinílico (PVA) também têm se destacado. Segundo Li *et al.* [25], elas melhoram a resistência à flexão e compressão mesmo após exposição a 900 °C. As fibras de aço, com alta condutividade térmica, distribuem o calor de forma mais uniforme, reduzindo deformações térmicas e melhorando as propriedades residuais [25]. Esse efeito foi mais pronunciado no desempenho à flexão do que à compressão, e as fibras de aço não influenciaram significativamente a velocidade do pulso ultrassônico [26]. Em contraste, as fibras de PP, com baixa condutividade térmica (0,11 W/(m·K)) [27], não afetam significativamente a condutividade do compósito [16].

As fibras de PP melhoram a resistência ao fogo e reduzem o lascamento, porém sua eficácia diminui em temperaturas elevadas. Sistemas híbridos, como a combinação de fibras de PP com basalto ou aço, mostram-se promissores, preservando as propriedades mecânicas mesmo sob calor intenso. Além disso, as fibras de aço favorecem uma distribuição mais uniforme do calor, contribuindo para melhores propriedades mecânicas residuais. Os estudos evidenciam que estratégias de reforço com fibras podem ser ajustadas para otimizar o desempenho ao fogo de materiais cimentícios. Entre as lacunas de pesquisa, destaca-se a necessidade de investigar o uso de fibras especificamente em argamassas de revestimento.

MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES

A adição de materiais cimentícios suplementares, como cinza volante, escória de alto-forno e sílica ativa, tem se mostrado eficaz na preservação das propriedades mecânicas de argamassas à base de cimento quando expostas a altas temperaturas. A Tabela 2 resume os estudos sobre o impacto desses materiais nas propriedades das argamassas sob condições de temperaturas elevadas.

Tabela 2 - Resumo dos efeitos de materiais cimentícios suplementares nas propriedades de argamassas em altas temperaturas

Materiais Cimentícios Suplementares	**Efeitos em Altas Temperaturas**
Cinza volante	Formação de géis C-S-H [28]. Produção de gehlenita a 900 °C, fortalecendo a zona de transição interfacial (ZTI) [29]. Redução de microfissuras [28]. Consumo de $Ca(OH)_2$, formando C-S-H e tobermorita [29, 30].
Escória de alto-forno	Formação de gehlenita, preenchendo poros e resultando em uma estrutura mais compacta [31]. Consumo de $Ca(OH)_2$, promovendo a formação de C-S-H [32].
Sílica ativa	Limite de adição: Até 10% para preservar propriedades acima de 400 °C, evitando aumento excessivo da pressão interna do vapor [33, 34, 35]. Efeito de preenchimento: Partículas ultrafinas (<1 µm) proporcionam microestrutura mais densa comparada à cinza volante e escória [30].
Nanoargila	Microestrutura mais compacta [36]. Aceleração da hidratação do cimento [36].
Nanossílica	Microestrutura mais compacta [37].
Pó de Basalto	Mitigação dos efeitos negativos do $Ca(OH)_2$ [38].
Pó de diatomita calcinada	Redução da intensidade dos picos de $Ca(OH)_2$ com o aumento da temperatura e do teor de adição [39].
Pó de Vidro	Adição de 10% melhora a resistência à compressão devido à atividade pozolânica [40]. Transformação na transição vítrea, contribuindo para o preenchimento de poros e microfissuras [41].

Fonte: Os autores (2025).

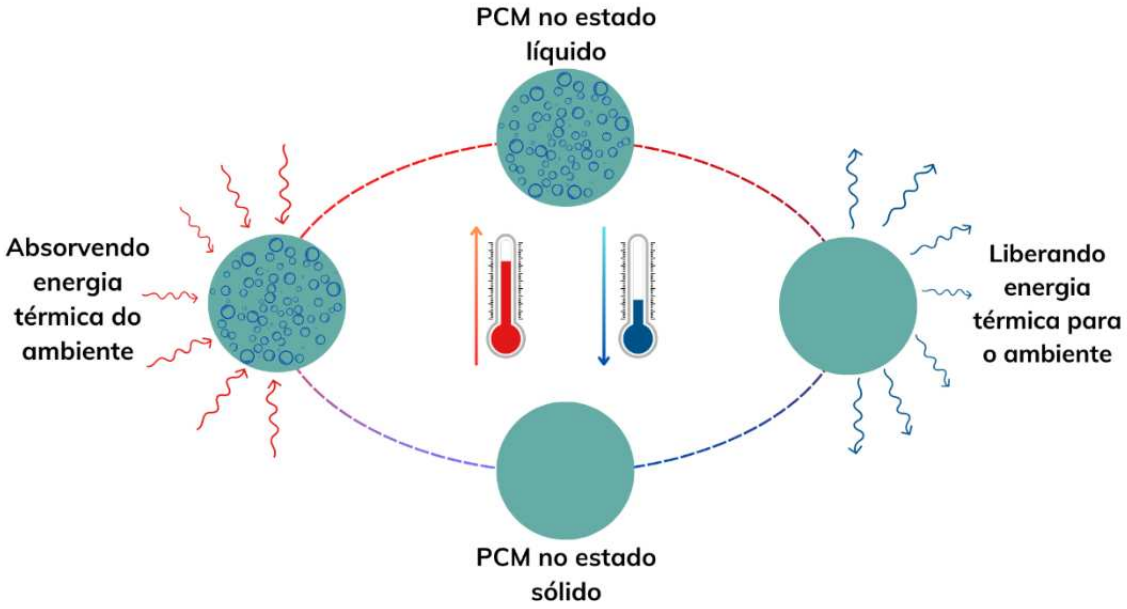
Cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa, nanoargila e nanossílica se destacam por melhorar a resistência mecânica, preencher vazios e formar microestruturas mais densas. Adicionalmente, as pozolanas, por reduzirem o teor de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) na matriz, reduzem os efeitos negativos da sua transformação em óxido de cálcio (CaO) durante a exposição a altas temperaturas, entre 450 e 550 °C [42]. Esse processo de perda de água ($Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O$) faz com que o CaO resultante, ao entrar em contato com a água durante o resfriamento, reidrate, formando novamente $Ca(OH)_2$, o que pode gerar uma expansão súbita na matriz e danificá-la.

Além disso, materiais menos convencionais, como clinoptilolita [43], pó de resíduo cerâmico [44], biochar [45] e pó de mármore [46], também apresentam resultados promissores na manutenção das propriedades residuais após exposição térmica. Embora esses materiais aumentem a resistência ao fogo e ofereçam alternativas mais econômicas e sustentáveis ao cimento Portland, ainda há a necessidade de pesquisas mais detalhadas sobre sua aplicação em argamassas de revestimento e suas propriedades térmicas.

MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

Os Materiais de Mudança de Fase, ou PCMs (*Phase Change Materials*), utilizam calor latente para alternar entre os estados sólido e líquido em resposta a variações de temperatura externa [47], conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 - Processo de mudança de fase em PCMs.



Fonte: Os autores (2025), adaptado de Frigione *et al*. [48].

A incorporação de PCMs em argamassas tem sido amplamente estudada devido à sua capacidade de prolongar o conforto térmico e reduzir a dependência de sistemas de climatização [48, 49]. Kim *et al.* [50] demonstraram resultados promissores, com redução na variação de temperatura e aumento da inércia térmica, alcançando uma melhoria de 15,7% na eficiência energética.

Em comparação com materiais de construção tradicionais, como rochas e argila, que são reconhecidos por sua alta capacidade térmica, os PCMs oferecem uma relação volume-massa mais eficiente para uma capacidade térmica equivalente [51]. Como resultado, o ambiente interno das edificações torna-se menos suscetível a flutuações de temperatura externa, proporcionando maior conforto térmico [47, 52].

Os PCMs mais utilizados comercialmente são de origem orgânica, como as parafinas [53]. No entanto, sua inflamabilidade pode comprometer a segurança contra incêndios [54, 53], exigindo avaliações detalhadas de seu comportamento em altas temperaturas. Apesar desses fatores, pesquisas nessa área ainda são escassas. A

Tabela 3 resume os principais estudos sobre argamassas com PCMs em condições de temperaturas elevadas.

Tabela 3 - Estudos sobre argamassas com PCMs em altas temperaturas.

Autor	**Cunha *et al.*** [55]	**Haurie *et al.*** [56]	**Cunha *et al.*** [57]	**Yoo *et al.*** [58]
Tipo de PCM (composição, fabricante)	Orgânico (Parafina, *Mikathermic D24 - Devan Chemicals*)	Orgânico (Parafina, *Micronal® DS 5001 - BASF*)	Orgânico (Parafina pura)	Orgânico (Parafina, *Nippon Seiro-Company*)
Temperatura de Mudança de Fase (°C)	21,0 e 24,0	26,0	20,0 e 23,0	47,0
Entalpia (kJ/Kg)	147,9	145,0	200,0	-
Idade de cura (dias)	28	28	28	28
Temperatura de ensaio (°C)	20, 200 e 600	-	20, 200, 400 e 600	100, 300, 500, 700 e 1000
Teor de substituição (%)	0 e 40	0, 10 e 20	0, 5, 10 e 20	0, 30, 50, 70 e 100
Metodologia	MEV, resistência à flexão, compressão e aderência por tração nas temperaturas analisadas	Teste de gotejamento	MEV, resistência à flexão e compressão nas temperaturas analisadas	Resistência à compressão, perda de massa, DRX, TGA/DTG e ME
Principais resultados	Maior demanda de água, reduzindo a resistência mecânica em todas as temperaturas	Maior demanda de água, reduzindo a resistência mecânica. Adição de 20% de PCM contribui para a propagação de chamas	Pequena redução no desempenho mecânico	Agregado revestido com 100% de PCM limitou a temperatura máxima e retardou o tempo para atingi-la

Fonte: Os autores (2025).

Em resumo, os PCMs representam uma alternativa promissora para melhorar o desempenho térmico de edificações. A literatura demonstra que o comportamento dos PCMs pode variar de acordo com diferentes fatores, como composição e método de incorporação nos materiais, assim como as propriedades intrínsecas das argamassas nas quais são aplicados. É essencial desenvolver estratégias para mitigar a redução da resistência mecânica causada pelo aumento da demanda de água. Além disso, são necessários mais estudos sobre o comportamento desses materiais em condições extremas e a longo prazo, já que os ensaios existentes foram realizados apenas aos 28 dias.

TIPO DE AGREGADO

A escolha de agregados resistentes a altas temperaturas deve priorizar sua estabilidade física e química, conforme destacado por Aydin *et al.* [29]. Em situações de calor intenso, a pasta de cimento sofre retração devido à desidratação, enquanto os agregados expandem devido à sua expansão térmica [59]. Essa diferença de comportamento térmico cria tensões internas, resultando em esforços de tração na matriz cimentícia e compressão nos agregados, o que pode desencadear fissuração [60].

Agregados silicosos, por exemplo, passam por uma transformação de fase quando o quartzo-α se converte em quartzo-β em torno de 573 °C [61], resultando em uma expansão de aproximadamente 0,85% [62] e causando "*pop-outs*" no concreto. Agregados compostos por carbonatos, por outro lado, permanecem estáveis até 700 °C, quando o $CaCO_3$ começa a se decompor em CaO, liberando dióxido de carbono [29]. Segundo Aydin *et al.* [29], agregados sem sílica, como calcário, rochas ígneas, tijolo britado e escória de alto-forno, apresentam menor perda de resistência em altas temperaturas.

Agregados leves, como argila expandida e vermiculita expandida, destacam-se por sua estabilidade acima de 800 °C, uma vez que são produzidos em temperaturas próximas a 1200 °C [5, 63]. Durante sua fabricação, a vermiculita se expande entre 650 e 950 °C, resultando em uma densidade de 80 a 120 kg/m³, ponto de fusão entre 1240 e 1430 °C e condutividade térmica de 0,04 a 0,12 W/m·K [64]. Essas características, aliadas a um baixo coeficiente de expansão térmica, garantem excelente desempenho em condições de alta temperatura [65, 66]. Assim, argamassas com agregados leves tendem a superar as convencionais em situações de alta temperatura [29, 67, 68].

Além dos agregados leves, o uso de agregados revestidos com parafina e revestidos com hidróxido de alumínio [69], hidróxido de magnésio de baixo teor [6, 70], lã mineral [71] e pó de granito (substituindo 15% do agregado natural) [72] pode melhorar a resistência ao fogo das argamassas. Cacos de vidro reciclados, principalmente com partículas menores que 100 µm, promovem reações pozolânicas [73]. A 600 °C, argamassas com 100% de resíduos de vidro mantêm 85% de sua resistência à compressão, enquanto as convencionais preservam apenas 43,4% [74]. Materiais como rejeitos de minério de ferro, com alto teor de Fe_2O_3 (acima de 69%), limitam o surgimento de fissuras devido à alta condutividade térmica e à transição de fase do óxido de ferro próximo a 723 °C [75].

Em resumo, a seleção de agregados é crucial para o desempenho das argamassas em altas temperaturas. Agregados leves e aqueles sem sílica, como calcário e vermiculita, demonstram melhor comportamento em condições térmicas extremas (acima de 800 °C).

CONCLUSÕES

Esta revisão teve como objetivo compreender os fatores que influenciam o desempenho de argamassas em condições de altas temperaturas, identificando desafios no desenvolvimento de revestimentos resistentes ao fogo e ampliando o conhecimento sobre o comportamento de argamassas de cimento Portland sob altas temperaturas. A análise mostrou que, para criar estratégias eficazes de resistência ao fogo em estruturas de concreto e alvenaria, é essencial

entender os processos químicos e físicos que ocorrem em condições de calor extremo, especialmente quando materiais inovadores são incorporados.

As principais conclusões deste estudo são:

- Os nanotubos de carbono se destacam por melhorar a estabilidade térmica, inibir a propagação de trincas e contribuir para uma microestrutura mais densa e coesa. Eles proporcionam ganhos significativos na resistência à compressão e nas propriedades elásticas até 600 °C, podendo alcançar 800 °C em alguns casos.
- As fibras de polipropileno oferecem benefícios como diminuição da propabilidade de lascamento, mas apresentam desafios, como a redução da resistência acima de 400 °C devido à degradação das fibras a partir de ~160 °C.
- As fibras de aço mantêm suas propriedades até cerca de 800 °C, promovendo uma distribuição de calor mais uniforme e aumentando a resistência residual à compressão e flexão.
- Em relação aos materiais cimentícios suplementares, a cinza volante, escória de alto-forno granulada moída, sílica ativa, nanoargila e nanossílica ajudam a preservar as propriedades mecânicas das argamassas em altas temperaturas, melhorando sua microestrutura e reduzindo os efeitos negativos da transformação do $Ca(OH)_2$ em CaO e da expansão associada à sua reidratação. No entanto, é necessário cuidado na dosagem e no controle do tamanho das partículas, especialmente no caso da sílica ativa, para evitar problemas como o lascamento da matriz.
- Os materiais de mudança de fase, ou PCMs, demonstram grande potencial para melhorar o desempenho térmico das argamassas. No entanto, seu comportamento depende de fatores como o tipo de PCM, a quantidade utilizada, o método de incorporação e as características da argamassa.

Em resumo, quando projetadas corretamente, as argamassas podem manter propriedades mecânicas adequadas mesmo após exposição a altas temperaturas, tornando-se sistemas promissores para proteção passiva contra incêndios. No entanto, ainda existem lacunas importantes na literatura, como a necessidade de estudos sobre o comportamento pós-incêndio, simulações mais realistas de incêndio, o impacto da taxa de hidratação e a influência das propriedades térmicas na resistência ao fogo. Portanto, é essencial continuar investigando o comportamento das argamassas e o uso de adições inovadoras para aprimorar a segurança e a eficácia das estruturas em cenários de incêndio.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos às agências FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais; n° 5.43/2021 – bolsa de doutorado para Letícia Martins – e projeto APQ-01904-22 para Thaís Oliveira) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico; projeto 408058/2023-4 para Júlia Mendes, Thaís Oliveira e Letícia Martins; projeto 305818/2023-6 – pesquisadora PQ – para Júlia Mendes) pelo apoio financeiro. Agradecemos à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e à Pró reitora de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação (PROPPI). Por fim, agradecemos também o apoio e colaboração do Grupo de Pesquisa em Construção Sustentável e Inovadora – SICon – CNPq.

REFERÊNCIAS

[1] J. C. Mendes, “Thermal Properties of Cement-based Composites,” Universidade Federal de Ouro Preto (Doctoral Thesis), Ouro Preto, 2019.

[2] G. D'Ovidio, F. Martín-Fuertes, J. C. Marugán, S. Bermejo e F. S. Nitti, “Lithium fire protection design approach in IFMIF-DONES facility,” *Fusion Engineering and Design,* vol. 189, p. 113446. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113446, 2023.

[3] Y.-Y. Chen, Y.-J. Chuang, Close, C.-Y. Lin e S.-W. Chien, “The adoption of fire safety management for upgrading the fire safety level of existing hotel buildings,” *Building and Environment,* vol. 51, pp. 311-319. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.12.001, 2012.

[4] K. Mróz, I. Hager e K. Korniejenko, “Material Solutions for Passive Fire Protection of Buildings and Structures and Their Performances Testing,” *Procedia Engineering,* vol. 151, pp. 284-291. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.388, 2016.

[5] H. Caetano, L. Laím, A. Santiago, L. Durães e A. Shahbazian, “Development of Passive Fire Protection Mortars,” *Aplied sciences,* vol. 12(4), p. 2093. https://doi.org/10.3390/app12042093, 2022.

[6] J. Formosa, J. Chimenos, A. Lacasta, L. Haurie e J. Rosell, “Novel fire-protecting mortars formulated with magnesium by-products,” *Cement and Concrete Research,* vol. 41, pp. 191-196. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.009, 2011.

[7] X. Ma, J. Pan, J. Cai, Z. Zhang e J. Han, “A review on cement-based materials used in steel structures as fireproof coating,” *Construction and Building Materials,* vol. 315, p. 125623. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125623, 2022.

[8] R. P. d. Souza, F. Pacheco, G. L. Prager, A. M. Gil, R. Christ, V. M. d. Mello e B. F. Tutikian, “Verification of the Influence of Loading and Mortar Coating Thickness on Resistance to High Temperatures Due to Fire on Load-Bearing Masonries with Clay Tiles,” *Materials,* vol. 12, pp. 1-19. https://doi.org/10.3390/ma12223669, 2019.

[9] H. A. Ferenhof e R. F. Fernandes, “Desmistificando uma revisão de literatura como base para redação científica: Método SSF,” *Revista ACB,* vol. 21, pp. 550-563, 2016.

[10] A. M. Rashad, “Effect of carbon nanotubes (CNTs) on the properties of traditional

cementitious materials," *Construction and Building Materials,* vol. 153, pp. 81-101. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.089, 2017.

[11] G. H. Nalon, J. C. L. Ribeiro, E. N. D. d. Araújo, L. G. Pedroti, J. M. F. d. Carvalho, R. F. Santos e D. S. d. Oliveira, "Residual mechanical properties of mortars containing carbon nanomaterials exposed to high temperatures," *Construction and Building Materials,* vol. 275, p. 122123. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122123, 2021.

[12] J. d. S. Andrade Neto, T. A. Santos, S. d. A. Pinto, C. M. R. Dias e D. V. Ribeiro, "Effect of the combined use of carbon nanotubes (CNT) and metakaolin on the properties of cementitious matrices," *Construction and Building Materials,* vol. 271, p. 121903. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121903, 2021.

[13] N. Chousidis e G. Constantinides, "Fire endurance and corrosion resistance of nano-modified cement mortars exposed to elevated temperatures," *Ceramics International,* vol. 49, pp. 19182-19193. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.03.044, 2023.

[14] Y. Yao e H. Lu, "Mechanical properties and failure mechanism of carbon nanotube concrete at high temperatures," *Construction and Building Materials,* vol. 297, p. 123782. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123782, 2021.

[15] A. Sedaghatdoost, K. Behfarnia e M. Bayati, "The effect of curing period on the residual strength of Portland cement mortar containing MWCNTs at elevated temperature," *Construction and Building Materials,* vol. 196, pp. 144-153. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.119, 2019.

[16] M. R. Irshidat, N. Al-Nuaimi e M. Rabie, "Hybrid effect of carbon nanotubes and polypropylene microfibers on fire resistance, thermal characteristics and microstructure of cementitious composites," *Construction and Building Materials,* vol. 266, p. 121154. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121154, 2021.

[17] P. Nuaklong, N. Boonchoo, P. Jongvivatsakul, T. Charinpanitkul e P. Sukontasukkul, "Hybrid effect of carbon nanotubes and polypropylene fibers on mechanical properties and fire resistance of cement mortar," *Construction and Building Materials,* vol. 275, p. 122189. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122189, 2021.

[18] M. R. Irshidat, N. Al-Nuaimi e M. Rabie, "The Role of Polypropylene Microfibers in Thermal Properties and Post-Heating Behavior o Cementitious Composites," *Materials,* vol. 13, p. 2676. https://doi.org/10.3390/ma13122676, 2020.

[19] A. Çavdar, "The effects of high temperature on mechanical properties of cementitious composites reinforced with polymeric fibers," *Composites Part B: Engineering,* pp. 78-88. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.033, February 2013.

[20] C.-G. Han, Y.-S. Hwang, S.-H. Yang e N. Gowripalan, "Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement," *Cement and Concrete Research,* pp. 1747-1753. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.11.013, September 2005.

[21] M. Vaezi, A. Sedaghatdoost, M. N. Norouzifar e H. Madani, "Petrographic Investigation into the Influence of Chopped Basalt Fibers on the Microstructure of Portland Cement Mortars at Elevated Temperatures," *Journal of Materials in Civil Engineering,* vol. 33, pp. 04021078. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003704, 2021.

[22] M. Ezziane, T. Kadri, L. Molez, R. Jauberthie e A. Belhacen, "High temperature behaviour of polypropylene fibres reinforced mortars," *Fire Safety Journal,* vol. 71, pp. 324-331. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.11.022, 2015.

[23] Y. Yao, B. Wang, Y. Zhuge e Z. Huang, "Properties of hybrid basalt-polypropylene fiber reinforced mortar at different temperatures," *Construction and Building Materials,* vol. 346, p. 128433. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128433, 2022.

[24] M. Yildirim e H. B. Özhan, "Durability properties of basalt fiber-reinforced mortars with different mineral admixtures exposed to high temperatures," *Construction and Building Materials,* vol. 400, p. 132574. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132574, 2023.

[25] L. Li, D. Gao, Z. Li, M. Cao, J. Gao e Z. Zhang, "Effect of high temperature on morphologies of fibers and mechanical properties of multi-scale fiber reinforced cement-based composites," *Construction and Building Materials,* vol. 261, p. 120487. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120487, 2020.

[26] F. Koksal, M. A. Serrano-López, M. Şahin, O. Gencel e C. López-Colina, "Combined effect of steel fibre and expanded vermiculite on properties of lightweight mortar at elevated temperatures," *Materials and Structures,* vol. 48, pp. 2083–2092. https://doi-org.ez28.periodicos.capes.gov.br/10.1617/s11527-014-0294-7, 2015.

[27] Z. Han e A. Fina, "Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review," *Progress in Polymer Science,* vol. 36, pp. 914-944. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.11.004, 2011.

[28] M. Rais, M. Shariq, A. Masood, A. Umar e M. Alam, "An experimental and analytical investigation into age-dependent strength of fly ash mortar at elevated temperature," *Construction and Building Materials,* vol. 222, pp. 300-311. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.167, 2019.

[29] S. Aydin e B. Baradan, "Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars," *Cement and Concrete Research,* vol. 37, pp. 988-

995. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.005, 2007.

[30] X. Ming e M. Cao, “Development of eco-efficient cementitious composites with high fire resistance and self-healing abilities-a review,” *Resources, Conservation and Recycling,* vol. 162, p. 105017. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105017, 2020.

[31] S. Aydin, “Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice,” *Fire Safety Journal,* vol. 43, pp. 610-617. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.02.001, 2008.

[32] F. Delhomme, J. Ambroise e A. Limam, “Effects of high temperatures on mortar specimens containing Portland cement and GGBFS,” *Materials and Structures,* vol. 45, pp. 1685-1692. https://doi-org.ez28.periodicos.capes.gov.br/10.1617/s11527-012-9865-7, 2012.

[33] Ş. Yazıcı, G. İ. Sezer e H. Şengül, “The effect of high temperature on the compressive strength of mortars,” *Construction and Building Materials,* vol. 35, pp. 97-100. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.082, 2012.

[34] M. A. Moghadam e R. A. Izadifard, “Effects of zeolite and silica fume substitution on the microstructure and mechanical properties of mortar at high temperatures,” *Construction and Building Materials,* vol. 253, p. 119206. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119206, 2020.

[35] C. Ding, K. Xue, H. Cui, Z. Xu, H. Yang, X. Bao e G. Yi, “Research on fire resistance of silica fume insulation mortar,” *Journal of Materials Research and Technology,* vol. 25, pp. 1273-1288. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.004, 2023.

[36] M. R. Irshidat e M. H. Al-Saleh, “Thermal performance and fire resistance of nanoclay modified cementitious materials,” *Construction and Building Materials,* vol. 159, pp. 213-219. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.127, 2018.

[37] Z. Najeeb e M. A. Mosaberpanah, “Mechanical and durability properties of modified High-Performance mortar by using cenospheres and Nano-Silica,” *Construction and Building Materials,* vol. 362, p. 129782. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129782, 2023.

[38] A. H. Sevinç e M. Y. Durgun, “Elevated temperature performance of cementitious mortars containing pumice, barite, and basalt powder,” *Journal of Building Engineering,* vol. 78, p. 107552. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107552, 2023.

[39] M. Saridemir, S. Celikten e A. Yildirim, “Mechanical and microstructural properties of calcined diatomite powder modified high strength mortars at ambient and high temperatures,” *Advanced Powder Technology,* vol. 31, pp. 3004-3017.

https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.05.024, 2020.

[40] S. S. Patil e Y. D. Patil, "Effect of high temperature on the strength of mortar containing glass as a supplementary cementitious material: An experimental study," *Materials Today: Proceedings,* vol. 65, pp. 1511-1515. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.496, 2022.

[41] J.-X. Lu, B.-J. Zhan, Z.-H. Duan e C. S. Poon, "Improving the performance of architectural mortar containing 100% recycled glass aggregates by using SCMs," *Construction and Building Materials,* vol. 153, pp. 975-985. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.118, 2017.

[42] G.-F. Peng e Z.-S. Huang, "Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures," *Construction and Building Materials,* vol. 22. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.11.002, pp. 593-599, April 2008.

[43] C. Bilim, "Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material," *Construction and Building Materials,* vol. 25, pp. 3175-3180. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.02.006, 2011.

[44] M. Mohit e Y. Sharifi, "Thermal and microstructure properties of cement mortar containing ceramic waste powder as alternative cementitious materials," *Construction and Building Materials,* vol. 223, pp. 643-656. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.029, 2019.

[45] S. Navaratnam, H. Wijaya, P. Rajeev, P. Mendis e K. Nguyen, "Residual stress-strain relationship for the biochar-based mortar after exposure to elevated temperature," *Case Studies in Construction Materials,* vol. 14, p. e00540. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00540, 2021.

[46] İ. R. Bayer, O. Sevim e I. Demir, "Effects of High Temperature and Cooling Regimes on Properties of Marble Powder-Based Cementitious Composites," *Buildings,* vol. 13(10), p. 2527. https://doi.org/10.3390/buildings13102527, 2023.

[47] A. Sharma, V. Tyagi, C. Chen e D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 13, pp. 318-345. https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8, 2009.

[48] M. Frigione, M. Lettieri e A. Sarcinella, "Phase Change Materials for Energy Efficiency in Buildings and Their Use in Mortars," *Materials,* vol. 12, p. 1260. https://doi.org/10.3390/ma12081260, 2019.

[49] L. Haurie, J. Mazo, M. Delgado e B. Zalba, "Fire behaviour of a mortar with different mass fractions of phase change material for use in radiant floor systems," *Energy and*

Buildings, vol. 84, pp. 86-93. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.026, 12 2014.

[50] S. Kim, S. J. Chang, O. Chung, S.-G. Jeong e S. Kim, "Thermal characteristics of mortar containing hexadecane/xGnP SSPCM and energy storage behaviors of envelopes integrated with enhanced heat storage composites for energy efficient buildings," *Energy and Buildings,* vol. 70, pp. 472-479. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.087, 2014.

[51] M. M. Oliveira, C. d. C. Lucarelli e J. C. Carlo, "Uso de materiais de mudança de fase em sistemas construtivos: uma revisão integrativa de literatura," *Ambiente Construído,* pp. 67-11. http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000300610, 2022.

[52] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza e H. Mehling, "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications," *Applied Thermal Engineering,* vol. 23, pp. 251-283. https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8, 02 2003.

[53] M. K. Rathod e J. Banerjee, "Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 18, pp. 246-258. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.022, 02 2013.

[54] E. K. Asimakopoulou, D. I. Kolaitis e M. A. Founti, "Fire safety aspects of PCM-enhanced gypsum plasterboards: An experimental and numerical investigation," *Fire Safety Journal,* vol. 72, pp. 50-58. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.02.004, 02 2015.

[55] S. Cunha, J. Aguiar e F. Pacheco-Torgal, "Effect of temperature on mortars with incorporation of phase change materials," *Construction and Building Materials,* vol. 98, pp. 89-101. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.077, 11 2015.

[56] L. Haurie, S. Serrano, M. Bosch, A. I. Fernandez e L. F. Cabeza, "Single layer mortars with microencapsulated PCM: Study of physical and thermal properties, and fire behaviour," *Energy and Buildings,* vol. 111, pp. 393-400. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.028, 2016.

[57] S. Cunha, M. Silva e J. Aguiar, "Behavior of cementitious mortars with direct incorporation of non-encapsulated phase change material after severe temperature exposure," *Construction and Building Materials,* vol. 230, p. 117011. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117011, 2020.

[58] D. H. Yoo, I. K. Jeon, H. G. Kim, J. S. Lee e J.-S. Ryou, "Experimental evaluation of fire resistance performance of cement mortar with PCM/Mg(OH)2-based composite fine aggregate," *Construction and Building Materials,* vol. 287, p. 123018. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123018, 2021.

[59] L. M. Martins, J. M. F. d. Carvalho, T. M. d. Oliveira e J. C. Mendes, "Behavior of cement-based coating mortars under fire or high temperatures: a systematic literature review," *Construction and Building Materials,* vol. 443, p. 137661. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137661, 2024.

[60] M. J. Miah, H. Kallel, H. Carré, P. Pimienta e C. L. Borderie, "The effect of compressive loading on the residual gas permeability of concrete," *Construction and Building Materials,* vol. 217, pp. 12-19. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.057, 2019.

[61] I. Hager, "Behaviour of cement concrete at high temperature," *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences,* vol. 61, pp. 145-154. https://doi.org/10.2478/bpasts-2013-0013, March 2013.

[62] P. Mehta e P. J. M. Monteiro, Concrete: Microstructure, Properties, and Materials., São Paulo: IBRACON, 2014.

[63] A. Kounadis, N. Anagnostopoulos, P. Douvis, P. Nomikos, A. Benardos, A. Tsakiris e E. Katsivelis, "Using a vermiculite-based fire protection mortar to increase the fire resistance of reinforced concrete tunnels," *Expanding Underground - Knowledge and Passion to Make a Positive Impact,* pp. 687-694. , 2023.

[64] S. Suvorov e V. Skurikhin, "Vermiculite - a Promising Material for High-Temperature Heat Insulators," *Refractories and Industrial Ceramics,* vol. 44, pp. 186 - 193. https://doi.org/10.1023/A:1026312619843, 2003.

[65] A. M. Neville, Properties of Concrete, 2 ed., 1997.

[66] F. Koksal, T. Nazlı, A. Benli, O. Gencel e G. Kaplan, "The effects of cement type and expanded vermiculite powder on the thermo- mechanical characteristics and durability of lightweight mortars at high temperature and RSM modelling," *Case Studies in Construction Materials,* vol. 15, p. e00709. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00709, 2021.

[67] M. Stefanidou e V. Pachta, "Influence of perlite and aerogel addition on the performance of cement-based mortars at elevated temperatures," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* vol. 410, pp. 1-9. https://doi.org/10.1088/1755-1315/410/1/012111, 2020.

[68] M. C. Pereira, A. Soares, I. Flores-Colen e J. R. Correia, "Influence of Exposure to Elevated Temperatures on the Physical and Mechanical Properties of Cementitious Thermal Mortars," *Applied Sciences,* vol. 10, p. 2200. https://doi.org/10.3390/app10062200, 2020.

[69] H.-K. Kim e J.-S. Ryou, "New approach for delaying the internal temperature rise of fire resistant mortar made with coated aggregate," *Construction and Building Materials,* vol. 149, pp. 76-90. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.116, 2017.

[70] J. Formosa, J. Chimenos, A. Lacasta e L. Haurie, "Thermal study of low-grade magnesium hydroxide used as fire retardant and in passive fire protection," *Thermochimica Acta,* vol. 515, pp. 43-50. https://doi.org/10.1016/j.tca.2010.12.018, 2011.

[71] C. P. Ramírez, A. V. Barriguete, R. S. Somolinos, M. d. R. Merino e E. A. Sánchez, "Analysis of fire resistance of cement mortars with mineral wool from recycling," *Construction and Building Materials,* vol. 265, p. 120349. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120349, 2020.

[72] B. Jeyaprabha, G. Elangovan e P. Prakash, "Strength and microstructure of fired mortars with river sand alternatives after air cooling," *Materials and Structures,* vol. 50, pp. 1-14. https://doi.org/10.1617/s11527-016-0886-5, 2017.

[73] B. Chen, H. Zhu, B. Li, M. Sham e Z. Li, "Study on the fire resistance performance of cementitious composites containing recycled glass cullets (RGCs)," *Construction and Building Materials,* vol. 242, p. 117992. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117992, 2020.

[74] Y. Zaetang, J. Lao-un, A. Wongkvanklom, A. Wongsa, V. Sata e P. Chindaprasirt, "Fire-resistant and Thermal Insulation Improvements of Cement Mortar with Auto Glass Waste Sand," *KSCE Journal of Civil Engineering,* vol. 27, pp. 4032-4042. https://doi.org/10.1007/s12205-023-0442-0, 2023.

[75] J. Borucka-Lipska, P. Brzozowski, J. Błyszko, R. Bednarek e E. Horszczaruk, "Effects of Elevated Temperatures on the Properties of Cement Mortars with the Iron Oxides Concentrate," *Materials,* vol. 14, p. 148. https://doi.org/10.3390/ma14010148, 2021.