XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8789

Avaliação experimental de argamassas com feldspato potássico hidrotermicamente modificado em temperaturas elevadas

Experimental evaluation of mortars with hydrothermally modified K-feldspar at elevated temperatures

Jacinto Manuel Antunes de Almeida
PUCRS | Porto Alegre | Brasil | jasscarnival@gmail.com
Ana Paula Kirchheim
UFRGS | Porto Alegre | Brasil | anapaulak@gmail.com

Resumo

O objetivo da pesquisa foi avaliar a influência da substituição parcial do cimento Portland por um material multifásico à base de feldspato hidrotermicamente modificado (MPM) no comportamento da argamassa em temperaturas elevadas. Após moldagem e cura durante 28 dias, os corpos de prova foram aquecidos até às temperaturas de 400°C e 600°C. Após o resfriamento, avaliou-se a resistência à compressão. Complementarmente, foram realizadas análises de DRX para avaliar qualitativamente as alterações microestruturais na pasta. Na temperatura ambiente a substituição em massa do cimento de 5%, 15% e 25% de MPM reduziu a resistência à compressão em 4%, 2% e 31%, respectivamente. Em contrapartida, a utilização de 15% de MPM contribuiu para mitigar substancialmente a redução da resistência à compressão em 400°C e em 600°C. As análises de DRX indicam que o MPM favoreceu mecanismos de hidratação tardia em temperaturas inferiores a 400°C. Conclui-se que o MPM, em teores moderados, pode ser uma alternativa promissora para reduzir o consumo de cimento Portland e melhorar o comportamento de materiais cimentícios submetidos a altas temperaturas.

Palavras-chave: Argamassa. Feldspato. MPM. Temperaturas elevadas.

Abstract

The aim of this research was to evaluate the influence of a multiphase material, based on hydrothermally modified k-feldspar (MPM), on the behavior of mortar at high temperatures. After molding and curing for 28 days, specimens were heated to 400°C and 600°C. After slow cooling, compressive strength was evaluated. Additionally, XRD analyses were performed to qualitatively assess microstructural changes in cement paste. At room temperature, 5%, 15%, and 25% MPM mass replacement of cement reduced the compressive strength by 4%, 2%, and 31%, respectively. On the other hand, the use of 15% MPM contributed to mitigate the compressive strength reduction at 400°C and 600°C. According to XRD analyses, MPM favored delayed hydration below 400°C. It is concluded that MPM, at moderate replacement levels, may be a promising alternative to reduce Portland cement consumption and improve the behavior of cementitious materials at high temperatures.

Keywords: Mortar. Feldspar. MPM. High temperatures.

1 INTRODUÇÃO

A exposição prolongada a altas temperaturas provoca alterações na composição química e na estrutura física dos materiais cimentícios. Quando a temperatura

Como citar:
ALMEIDA, J.; KIRCHHEIM, A. Avaliação experimental de argamassas com feldspato potássico hidro termicamente modificado em temperaturas elevadas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

aumenta, a decomposição gradual dos compostos hidratados, a retração da pasta e a expansão térmica diferencial entre agregados e pasta provocam um aumento da microfissuração e da porosidade. Consequentemente, observa-se a redução progressiva da resistência à compressão e do módulo de elasticidade [1][2][3].

Diversas estratégias têm sido utilizadas para melhorar o comportamento térmico de materiais cimentícios. Nesse contexto, adições minerais à base de feldspato podem ser alternativas promissoras e sustentáveis devido à abundante disponibilidade natural e sua composição química [4].

A substituição parcial da areia por pó de feldspato proveniente de resíduo cerâmico demonstrou reduzir a condutividade térmica de argamassas de cimento Portland branco [5]. A substituição de 15% de cimento Portland por pó de feldspato natural provocou um aumento significativo da resistência à compressão residual da argamassa, após exposição a 400°C [6].

Por outro lado, dependendo do teor de substituição e das características físicas e químicas, materiais cimentícios suplementares (MCS) à base de feldspato, ainda que em teores baixos de substituição de 5%, podem reduzir a resistência da argamassa na temperatura ambiente em 17% [5][6].

Apesar dos avanços, existem divergências e lacunas no estudo do comportamento de MCS não pozolânicos em temperaturas elevadas. Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência de um material multifásico resultante da modificação hidrotérmica do feldspato potássico natural (MPM) na resistência à compressão e na microestrutura de argamassas de cimento Portland expostas a temperaturas elevadas. Este material é um silicato mineral sintetizado a partir do feldspato potássico e $Ca(OH)_2$ com características não amorfas. Optou-se pela utilização da argamassa neste estudo devido à quantidade limitada de MPM disponível para a pesquisa.

O uso de materiais como o MPM representa uma abordagem inovadora, uma vez que o processamento pode alterar a estrutura cristalina e a capacidade de retenção de água do feldspato, influenciando a hidratação tardia e a estabilidade térmica da matriz cimentícia.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para temperaturas elevadas de até 105°C ocorre a decomposição da etringita e a evaporação da água livre nos poros. Até temperaturas de 200°C pode ocorrer o aumento da portlandita devido à hidratação tardia de compostos não hidratados ou reidratação depois de entrar em contato com a umidade ambiente. Acima de 450°C a portlandita ($Ca(OH)_2$) decompõe-se em CaO, podendo ocorrer a reidratação do CaO após resfriamento, devido à umidade ambiente. A partir dos 500°C a decomposição do C-S-H acentua-se e acima de 650°C ocorre a decomposição da calcita ($CaCO_3$) [7].

O tipo de aglomerante e as adições minerais podem influenciar os resultados experimentais em altas temperaturas. Cimentos Portland com incorporação de escória e cinza volante ou com menores teores de óxido de cálcio (CaO) resultam em uma

menor quantidade de portlandita, consequentemente, a expansão da pasta em temperaturas elevadas acima de 400°C é menor, reduzindo a fissuração e mitigando a redução da resistência residual à compressão [8][9].

De forma geral, a substituição parcial de cimento Portland por teores de 20% e 30% de escória granulada de alto forno ou combinada com 10% de feldspato provocou uma redução na resistência à compressão da argamassa na temperatura ambiente, aos 7, 28 e 90 dias e a redução foi variável, dependendo dos teores combinados de substituição, da idade e da relação água/aglomerante. Já em altas temperaturas a combinação de 20% de escória e 10% de feldspato provocou aumentos de até 20% na resistência à compressão residual da argamassa após exposição a 200°C, 400°C e 600°C [6].

A resistência à compressão da argamassa na temperatura ambiente reduziu significativamente com a substituição de cimento Portland por pó de feldspato natural, entre 17% e 45%, respectivamente, para teores de 5% e 25% de substituição. Em altas temperaturas de 400°C, 600°C e 800°C a resistência das argamassas com pó de feldspato foi igual ou superior à argamassa de referência. Em 400°C a resistência residual à compressão da argamassa com 15% de feldspato foi 19% superior à mistura de referência e a sua resistência aumentou 47% relativamente à temperatura ambiente [5].

A resistência da argamassa com 20% de substituição de cimento Portland por resíduo de pó cerâmico contendo feldspato, aumentou 11,7% e 3,7%, respectivamente, após exposição a 200°C e a 300°C. Em 500°C ocorreu perda de resistência de 24,4%, no entanto, foi inferior à redução de 31,9% observada na argamassa de referência [10].

Pode afirmar-se, com base na literatura, que o comportamento em temperaturas elevadas de materiais cimentícios contendo feldspato é variável e dependente do equilíbrio entre a redução do teor de clínquer, o aumento da porosidade e eventuais efeitos benéficos associados à hidratação tardia ou ao efeito *filler*.

A hidratação tardia pode ocorrer em função da disponibilidade de água residual armazenada nos poros capilares, da redistribuição de água presente nos produtos hidratados e da absorção de umidade do ambiente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Foi utilizado cimento Portland CP V-ARI RS e MPM, como substituição parcial do cimento, com diâmetro médio de partícula, respectivamente, de 11,56 µm e 20,51 µm, e massa específica de 3,10 g/cm³ e 2,62 g/cm³. O MPM é patenteado e licenciado pela empresa APT – *Advanced Potash Technologies Ltd*. Com base em estudos preliminares, o MPM não se caracteriza como material pozolânico, possui fases cristalinas predominantes de microclima e ortoclase ($KAlSi_3O_8$) e elevada capacidade de retenção de água. A areia natural, de origem quartzosa, foi proveniente da região metropolitana de Porto Alegre/RS, originária do rio Jacuí, com tamanho nominal máximo de 2,40 mm,

módulo de finura de 2,40 e densidade de 2,63 g/cm³. Devido à elevada capacidade de retenção de água do MPM, utilizou-se um aditivo superplastificante de alto desempenho, à base de policarboxilatos (SP), para garantir uma trabalhabilidade adequada para as moldagens. A Tabela 1 resume a caracterização química e física do cimento CP-V ARI e do MPM testado. Salienta-se que o MPM pode ser facilmente modificado física e quimicamente através do processamento patenteado pela APT.

Tabela 1: Composição química e física dos materiais

Parâmetro	CP-V ARI RS	MPM
SiO_2 (%)	17,83	44,06
CaO (%)	68,11	23,01
Al_2O_3 (%)	1,92	10,65
Fe_2O_3 (%)	2,96	3,73
K_2O (%)	1,28	9,75
MgO (%)	1,49	0,74
SO_3 (%)	3,02	-
Na_2O (%)	0,17	1,27
Others (%)	0,66	0,89
L.O.I (%)	2,56	5,90
Blaine (cm^2/g)	4.401	10.066
D_{10} (µm)	1,73	11,95
D_{50} (µm)	9,96	18,51
D_{90} (µm)	25,83	29,64
D_m (µm)	11,56	20,51

Fonte: o autor.

3.2 TRAÇOS

Foram testados quatro traços de argamassa com relação água/aglomerante fixada em 0,60, consistência mínima de 200±5 mm e resistência à compressão mínima de 20 MPa aos 28 dias. Adicionalmente, foram moldadas pastas de cimento com proporções semelhantes às das argamassas, para análises microestruturais de difração de raios-X (DRX). A Tabela 2 apresenta os traços unitários, em massa, para a argamassa de referência (REF) e para as argamassas com teores de substituição em massa, de até 25% de MPM (25MPM).

Tabela 2: Traços unitários das argamassas em massa

Mistura	CP-V ARI	MPM	Areia	SP	a/agl
Referência (REF)	1,00	0,00	3,00	0,005	0,60
5% de substituição (5MPM)	0,95	0,05	3,00	0,005	0,60
15% de substituição (15MPM)	0,85	0,15	3,00	0,005	0,60
25% de substituição (25MPM)	0,75	0,25	3,00	0,005	0,60

Fonte: o autor.

3.3 MÉTODOS

Como fatores controláveis, foram avaliados o teor de MPM e a temperatura de exposição. Como variável de resposta foi avaliada a resistência à compressão.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos, de 50x100 mm, com base nos procedimentos da NBR 7215 [11], prevendo 3 repetições por resultado, por limitação da quantidade de MPM disponível. Procurou-se garantir a confiabilidade dos resultados através do controle rigoroso da moldagem, cura e ensaio. A cura foi

realizada durante 28 dias, em câmara úmida, com temperatura de 23±2°C e umidade relativa acima de 95%. Após o período de cura, os corpos de prova foram colocados em estufa por 24 horas a uma temperatura de 100°C±5°C, para estabilização da umidade interna e da resistência, antes da exposição às temperaturas elevadas.

As amostras foram submetidas a temperaturas elevadas de 400°C e 600°C com base nos procedimentos da RILEM TC-129 [12], sem carga aplicada, em um forno elétrico programável, utilizando taxa de aquecimento constante de 5°C/min, até atingir-se a temperatura de ensaio, mantendo-se a temperatura constante por 60 minutos. O resfriamento foi lento, dentro do forno durante 24 horas.

A resistência à compressão foi obtida com base na NBR 7215 [11]. Complementarmente, avaliou-se a porosidade total por absorção de água, na temperatura ambiente, com base na NBR 9778 [13].

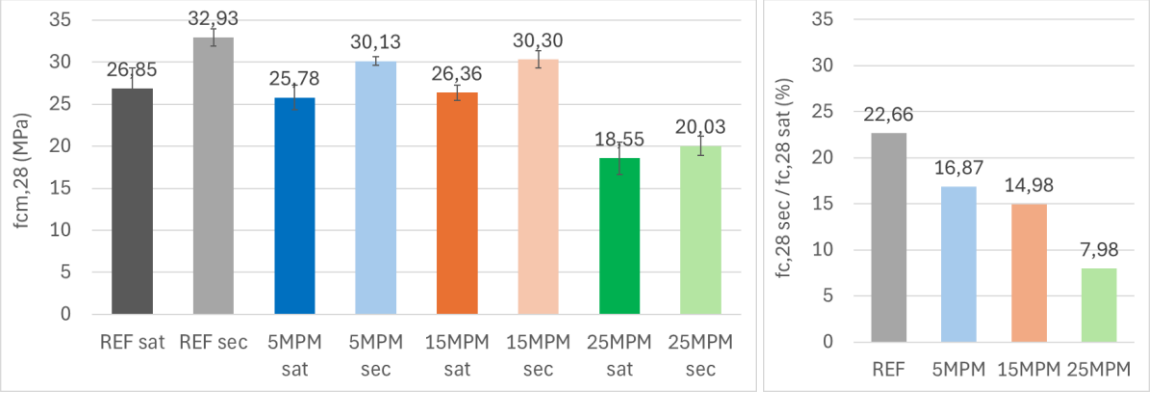
Os ensaios de difração de raios-X foram realizados em pastas de cimento com 0%, 5% e 25% de MPM. Os ensaios de DRX foram realizados utilizando difratômetro da marca Philips, modelo X'Pert MPD. Na análise de DRX procurou identificar-se e comparar a intensidade dos picos principais correspondentes a etringita (E), portlandita (P), calcita (C) e microclina (F), utilizando o banco de dados padrão de difração de raios X do Centro Internacional de Dados de Difração (ICDD): 00-041-1451, 00-043-1494, 00-005-0586 e 00-019-0932. A análise de DRX concentrou-se nesses compostos por serem considerados na literatura como indicadores da degradação térmica das pastas.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E POROSIDADE TOTAL DAS ARGAMASSAS

A Figura 1 apresenta os resultados da resistência à compressão das argamassas na temperatura ambiente, em condição saturada (sat) e após o acondicionamento térmico de 100°C (sec). Na condição saturada, a substituição parcial de 5%, 15% e 25% de MPM provocou redução, não proporcional, da resistência à compressão, respectivamente, de 4%, 2% e 31%. Khoshkbijari et al. [14] observaram que o aumento do teor de pó de feldspato provocou a redução proporcional da resistência à compressão da argamassa. O acondicionamento térmico em 100°C provocou o aumento da resistência de todas as argamassas, entre 7,98% e 22,66%, e o aumento foi maior para a argamassa de referência. A porosidade total na temperatura ambiente foi de 11,1%, 11,8%, 12,7% e 14,5%, respectivamente, para as argamassas com 0% (referência), 5%, 15% e 25% de MPM. A maior redução da resistência da argamassa com 25% de MPM está relacionada, em parte, à redução do teor de cimento e ao aumento da porosidade, provocado pela maior demanda de água do material, indicando a formação de uma matriz com menor teor de C-S-H.

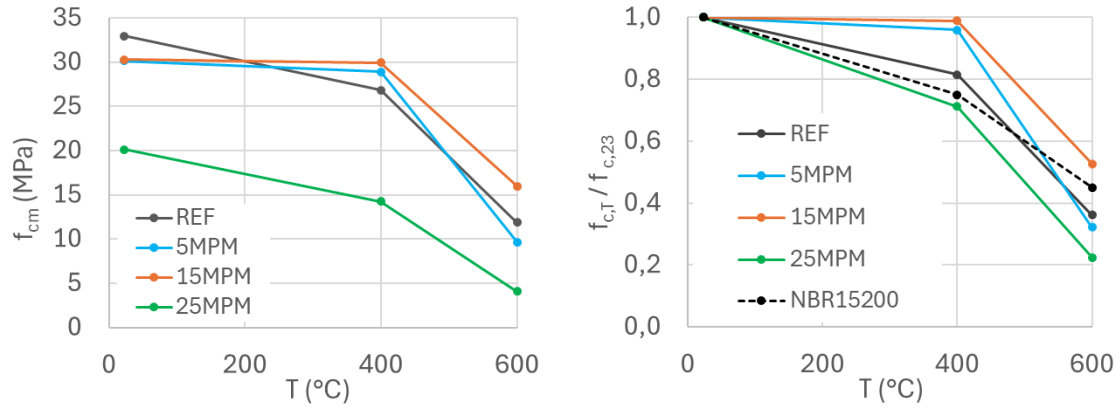
Figura 1: Resistência à compressão antes (sat) e após acondicionamento térmico em 100°C (sec).



Nota: médias e desvios padrão (esquerda) e aumento da resistência média após o acondicionamento térmico (direita).
Fonte: o autor.

Após 400°C e 600°C a resistência média à compressão da argamassa de referência, sem MPM, reduziu 19% e 64%, respectivamente (Figura 2). Em 400°C a redução da resistência das argamassas com 5% e 15% de MPM foi de 1% e 4%, respectivamente. Em 400°C e 600°C a resistência à compressão da argamassa com 15% de MPM foi superior à argamassa de referência e aos valores de referência da NBR 15200, norma para estruturas de concreto em situação de incêndio [15]. Em 600°C a resistência residual da argamassa com 5% de MPM foi 11% inferior à referência, o que poderá estar associado a variabilidade experimental ou à heterogeneidade microestrutural.

Figura 2: Resistência à compressão após exposição a temperaturas elevadas.

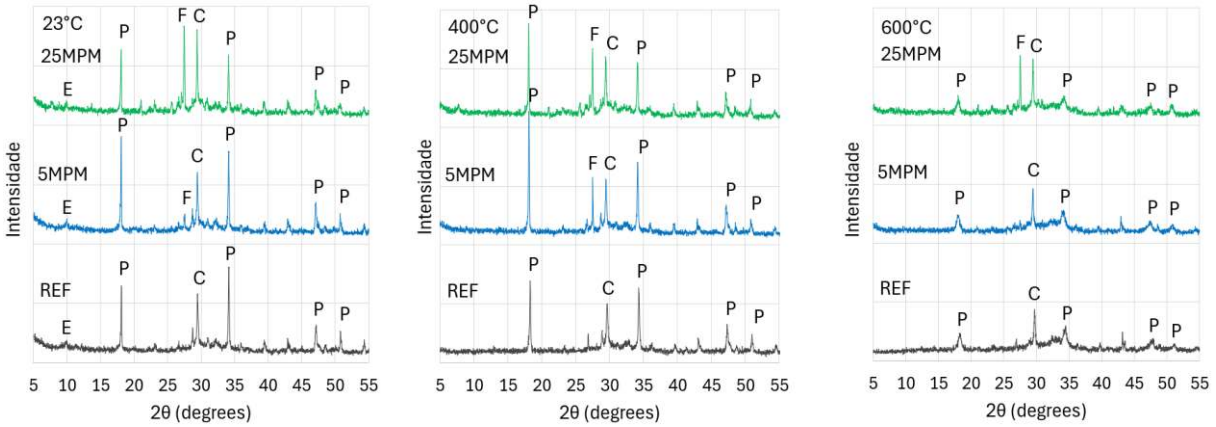


Nota: Valores absolutos (esquerda) e valores relativos à resistência na temperatura ambiente (direita).
Fonte: o autor.

4.2 DIFRACÇÃO DE RAIOS X

A Figura 3 mostra os difratogramas das pastas cimentícias para as diferentes temperaturas de exposição.

Figura 3: Difratogramas das pastas cimentícias expostas a temperaturas elevadas.



Nota: 23°C (esquerda), 400°C (meio) e 600°C (direita). E: etringita, P: portlandita, C: calcita e F: microclina.
Fonte: o autor.

Na pasta com 5% de MPM, em 23°C, observou-se um pico de portlandita (18° 2θ) com maior intensidade. Em 400°C observou-se a decomposição da etringita (9° 2θ) em todas as amostras e na pasta com 5% de MPM ocorreu um aumento considerável no pico de portlandita (18° 2θ). O aumento de portlandita indica a hidratação tardia de compostos anidros em temperaturas de até 200°C, contribuindo para a formação de C-S-H e o refinamento parcial da microestrutura de poros, mitigando a redução da resistência em temperaturas elevadas [7]. Na pasta de referência ocorreu redução da portlandita (34° 2θ) e da calcita (30° 2θ) em 400°C, indicando a decomposição parcial dos compostos hidratados, contribuindo para a redução da resistência. Em 400°C, observou-se um aumento no pico de portlandita (18° 2θ) e uma redução da calcita (30° 2θ) na pasta com 25% de MPM. Neste caso, eventuais benefícios da hidratação tardia não foram suficientes para mitigar a redução da resistência, devido ao aumento excessivo da porosidade da pasta e à redução do teor de cimento. Após 600°C, todas as amostras apresentaram redução substancial nos picos de portlandita. Nesta temperatura a decomposição do C-S-H e o aumento da porosidade são os principais fatores para a redução da resistência em 600°C [1][2][3][7]. Em 600°C a decomposição dos principais produtos hidratados foi preponderante, reduzindo os benefícios associados ao MPM.

Os resultados sugerem que o MPM pode alterar a cinética de hidratação da pasta em temperaturas moderadas, devido à capacidade de retenção de água e à presença de fases ricas em potássio, que podem beneficiar a solução de poros, exigindo, no entanto, um controle rigoroso, para não afetar a durabilidade na temperatura ambiente a longo prazo.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da substituição parcial de cimento Portland por feldspato potássico modificado hidrotermicamente (MPM) nas propriedades macroestruturais e microestruturais de argamassas e pastas de cimento Portland em altas temperaturas.

Os resultados indicam que o comportamento das argamassas com MPM em temperaturas elevadas está diretamente relacionado à interação entre composição química, porosidade e mecanismos de hidratação tardia. Comparativamente à argamassa de referência, o teor baixo de MPM (5%) promoveu melhorias na resistência residual em 400°C, relacionadas à hidratação tardia. O teor elevado de 25% de MPM provocou o aumento excessivo da porosidade, que, associado ao menor teor de cimento, comprometeu a resistência em todas as temperaturas. O teor intermediário, de 15%, mitigou substancialmente a redução da resistência em 400°C e em 600°C, indicando existir um equilíbrio na dosagem.

Os resultados apresentados mostram o potencial do uso do MPM, em teores moderados, para reduzir o consumo de cimento Portland e melhorar o comportamento da argamassa em temperaturas elevadas. Por outro lado, evidenciam a importância do ajuste fino da dosagem para maximizar os potenciais benefícios do material.

Como trabalhos futuros sugere-se ampliar o número de repetições por resultado, testar outras dosagens, ampliar as análises microestruturais e avaliar a aplicação do MPM em concretos submetidos a temperaturas elevadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam os agradecimentos à empresa APT – *Advanced Potash Technologies Ltd*., ao LAMTAC – Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído, do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação e ao LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pelo apoio à pesquisa.

DECLARAÇÃO

Os autores declaram que não utilizaram IA generativa nem tecnologias assistidas por IA no processo de preparação do manuscrito.

REFERÊNCIAS

[1] KHOURY, G. A. Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. **Magazine of Concrete Research**, v. 37, n. 161, p. 291-309. 1992. https://doi.org/10.1680/macr.1992.44.161.291

[2] KODUR, V. K. R. Properties of concrete at elevated temperatures. **International Scholarly Research Notices**, v. 2014, Article ID 468510, 15p. 2014. http://dx.doi.org/10.1155/2014/468510

[3] ALMEIDA, J.M.A. **Comportamento em altas temperaturas e na reidratação de concretos convencional e com cinza de casca de arroz**. 2017. 344p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2017.

[4] NOJOUKAMBARI, T. Y.; SADRMOMTAZI, A.; KHOSHKBIJARI, R. K. Influence of Feldspar and Ground Granulated Blast-furnace slag as a partial cement replacement on mechanical properties and thermal durability and environmental impacts of cement

mortars. **Journal of Cleaner Production**, v. 398. 2023. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136074.

[5] TORRES-CARRASCO, M.; ENRÍQUEZ, E.; TERRÓN-MENOYO, L.; CABRERA, M. J.; MUÑOZ, D.; FERNÁNDEZ, J. F. Improvement of thermal efficiency in cement mortars by using synthetic feldspars. **Construction and Building Materials**, v. 269, 121279. 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121279

[6] EDRIS, W. F.; AL-TAMIM, M.; ALDELGAWY, M. Implementation of feldspar as a partial replacement material in cement mortar (exploration and application). **Journal of Applied Engineering Science**, v. 20, p. 177-185. 2022. DOI: 10.5937/jaes0-31694

[7] ALONSO, C.; FERNANDEZ, L. Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. **Journal of Materials Science**, v. 39, p. 3015-3024, 2004. DOI: 10.1023/B:JMSC.0000025827.65956.18

[8] MENDES, A.; SANJAYAN, J.; COLLINS, F. Phase transformations and mechanical strength of OPC/Slag pastes submitted to high temperatures. **Materials and Structures**, v. 4, p. 345-350. 2008. https://doi.org/10.1617/s11527-007-9247-8

[9] XU, Y.; WONG, Y. L.; POON, C. S.; ANSON, M. Influence of PFA on cracking of concrete and cement paste after exposure to high temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 12, p. 2009-2016. 2003. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00216-3

[10] TOKAREVA, A.; WALDMANN, D. Durability Assessment of Cement Mortars with Recycled Ceramic Powders. **Materials**, n. 18, 4420. 2025. https://doi.org/10.3390/ma18184420

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2025.

[12] RILEM Technical Committee. **RILEM TC 129-MHT**: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. 2004.

[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

[14] KHOSHKBIJARI, R. K.; SAMIMI, M. F.; MOHAMMADI, F.; TALEBITAHER, P. Effects of Mica and Feldspar as partial cement replacement on the rheological, mechanical and thermal durability of self-compacting mortars. **Construction and Building materials**, v. 263, 120149. 2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120149

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2024.