

DESEMPENHO A ELEVADAS TEMPERATURAS DE MISTURAS ATIVADAS ALCALINAMENTE

ALEXANDRE MARINHO^{1*}, CARLOS JESUS¹, AIRES CAMÕES¹, RAFAEL ROBAYO-
SALAZAR², RUBY MEJÍA DE GUTIÉRREZ²

1: CTAC – Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058
Guimarães, Portugal

2: Grupo Materiales Compuestos (CENM), Universidad del Valle, Calle 13# 100-00, Cali, Colombia

marinhoalexandre3@gmail.com, cjesus@civil.uminho.pt, aires@civil.uminho.pt, rafael.robayo@correounivalle.edu.co,
ruby.mejia@correounivalle.edu.co

Resumo A sustentabilidade é um problema atual e preocupa a população global em geral. A utilização do cimento Portland é um dos principais responsáveis pela emissão de gases de efeito de estufa associados à indústria da construção, obrigando à procura de materiais alternativos. Neste contexto, as misturas ativadas alcalinamente (MAA), dispensando o uso de cimento, são uma alternativa inovadora e promissora aos materiais cimentícios tradicionais. A ocorrência de incêndios em edifícios mostra que são necessárias estruturas com resistência térmica acrescida, melhor que a conseguida com materiais cimentícios. Assim, procurou-se desenvolver uma MAA otimizada, que permita uma solução viável ao fogo, com um desempenho superior ao dos materiais cimentícios comuns. O dimensionamento da MAA ótima resultou da aplicação da metodologia da superfície de resposta (MSR). Os principais fatores no dimensionamento deste tipo de composições foram as razões molares dos seus constituintes e a razão água/ligante (A/L). As razões molares foram fixas de acordo com os precursores e ativadores utilizados e A/L foi considerada com o valor 0,3. As MAA otimizadas obtiveram valores de resistência mecânica à compressão na ordem dos 45 MPa e um desempenho superior ao fogo, quando comparadas com as misturas de controlo, produzidas com cimento Portland. Com base no trabalho desenvolvido, de modo a obter construções mais eficientes sob ação de temperaturas elevadas, as MAA demonstraram grande potencial de utilização.

Palavras-chave: Ativação alcalina, ativadores, precursores, resistência mecânica, temperatura

Abstract Sustainability is an issue nowadays and concerns the global population in general. The use of Portland cement is one of the main responsible for the emission of greenhouse gases associated with the construction industry, demanding in the search for alternative materials. In this context, alkaline activated mixtures (AAM), made without cement, are an innovative and promising alternative to cementitious traditional materials. The occurrence of fires in buildings shows that structures with enhanced thermal resistance are necessary, better than the one obtained with cementitious materials. Thus, it was developed an optimized MAA, which allows a viable solution to fire, with a performance superior to that of common cementitious materials. The design of the optimal AAM resulted from the application of the response surface methodology (RSM). The main factors in the design of this type of compositions were the molar ratios of their constituents and the water/binder ratio (W/B). The molar ratios were fixed according to the precursors and activators used and for W/B was adopted the value 0,3. The optimized AAM obtained mechanical compressive strength values in the range of 45 MPa and enhanced fire performance when compared to the control mixtures, made with Portland cement. Based on the work developed, in order to obtain more efficient constructions under the action of high temperatures, the use of AAM showed great potential.

Key-words: Alkaline activation, activators, precursors, mechanical resistance.

1. INTRODUÇÃO

O betão armado é o material estrutural mais amplamente utilizado na indústria da construção [1]. O betão quando exposto ao fogo ou elevadas temperaturas, apresenta uma alta degradação, levando à sua fissuração, subsequente destacamento do betão de recobrimento das armaduras e consequente perda de resistência mecânica do betão, preocupações fundamentais, especialmente em betões de elevada resistência [2]. A proteção das estruturas a elevadas temperaturas é fundamental e, neste enquadramento, é da maior importância aumentar a investigação na segurança contra incêndios, implementando soluções inovadoras e recorrendo a novos materiais resistentes.

A poluição ambiental é, atualmente, um dos maiores problemas que o mundo enfrenta. Este facto alarmante está diretamente relacionado com as emissões de CO₂ que são libertadas para a atmosfera. A indústria cimenteira é uma das principais fontes de emissões, sendo responsável por cerca de 8% das emissões globais [3], [4]. Os materiais ativados alcalinamente (geopolímeros) (MAA) apresentam uma alternativa à utilização do cimento Portland. A sustentabilidade é um dos fatores que deve ser bem esclarecido quando se aborda o tema da ativação alcalina. A utilização das cinzas volantes como precursor faz com que um resíduo industrial seja reutilizado. O facto de a cinza volante poder substituir o cimento Portland apresenta uma grande vantagem, a nível de emissões de gases de efeito de estufa para a atmosfera, pois o processo de produção do clínquer que origina o cimento é responsável por uma grande quantidade de emissões poluentes. Como a cinza volante é um subproduto, a sua produção não acarreta libertação de CO₂ [5].

As MAAs destacam-se entre os novos materiais que estão a ser propostos como alternativa aos betões em cimento Portland para a construção de estruturas mais resistentes ao fogo e às altas temperaturas.

Em geral, estes materiais demonstraram uma maior estabilidade físico-química após terem sido submetidos a temperaturas elevadas, incluindo às chamas diretas. No caso do cimento Portland, a degradação térmica está principalmente associada à desidratação de géis C-S-H (silicatos de cálcio hidratados), sulfato aluminatos (etringite), Portlandita (Ca(OH)₂) e à perda de água de mistura livre (capilar). Estes fatores conduzem à desintegração progressiva a nível microestrutural e à geração de tensões internas que acabam por colapsar as estruturas de betão. Na MAA, verificou-se que, dependendo do tipo de precursor e ativador alcalino, elevadas temperaturas podem levar a alterações microestruturais positivas, à densificação da matriz e à formação de novas fases de natureza cerâmica que proporcionam uma maior estabilidade térmica e mecânica [6].

O estudo passa pela otimização das MAA, inicialmente de pastas e posteriormente, de argamassas ativadas alcalinamente. O estudo visou estudar o comportamento termomecânico das argamassas produzidas com MAA, considerando o tipo de ativador alcalino e a relação Si/Al em função da taxa de aquecimento.

Para a obtenção das otimizações das misturas é necessário um estudo acerca das razões químicas associadas bem como dos métodos de mistura e cura.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os materiais utilizados foram: as cinzas volantes (CV) de classe F de acordo com a norma ASTM C618, provenientes da Central Termoelétrica do Pego, Portugal. Este precursor tem na sua constituição, em maiores quantidades, SiO₂ com 54,1%, Al₂O₃ com 22,9% e Fe₂O₃ com 12,8%. O metacaulino (Mk), onde os componentes em maiores quantidades são o SiO₂ com 51,4% e Al₂O₃ com 43,1%. Na produção das argamassas utilizou-se uma areia rolada natural fluvial com uma dimensão das partículas na ordem do 0/4 mm. O ligante usado na produção das misturas híbridas foi o Cimento Portland CEM I 42,5 R. Para as MAA usaram-se como ativadores, hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na₂SiO₃).

2.2 Otimização das MAA

O dimensionamento das MAA realizou-se com base na análise das composições químicas dos

precursores e dos ativadores. Estas propriedades permitiram a determinação das razões molares que possibilitaram definir a mistura com um determinado módulo molar, designada de mistura central (MC). A razão A/L utilizada nas pastas ativadas alcalinamente foi de 0,3. O dimensionamento da MC, realizou-se com base em quatro razões molares, equações 1, 2, 3 e 4. Os resultados variam consoante a utilização dos diferentes precursores e o tipo de ativadores.

$$\frac{\text{Mol SiO}_2}{\text{Mol Al}_2\text{O}_3} \quad (1)$$

$$\frac{\text{Mol Na}_2\text{O}}{\text{Mol SiO}_2} \quad (2)$$

$$L/S \quad (3)$$

$$\frac{\text{Mol Na}_2\text{O}}{\text{Mol Al}_2\text{O}_3} \quad (4)$$

Após definidos os módulos molares da MC, utilizou-se um *software* de cálculo estatístico para estabelecer um total de 13 misturas, como se mostra na Figura 1.

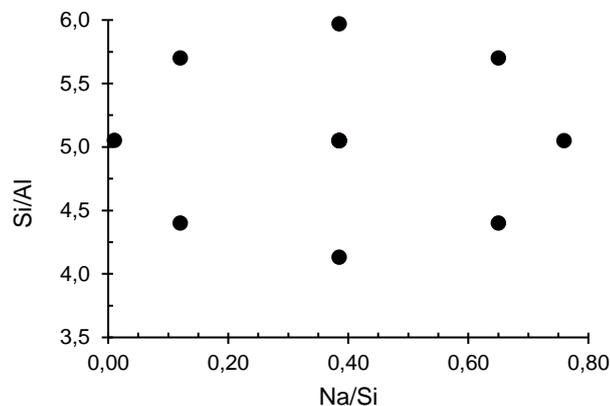


Figura 1. Misturas calculadas com recurso a um *software* de cálculo estatístico em função dos módulos molares da MC, 13 misturas no total.

As MAA com os diversos precursores seguiram a metodologia de dimensionamento acima referida. As cinzas volantes e o metacaulino foram fatores relevantes no estudo, tal como o tipo de ativadores utilizados, o hidróxido de sódio e o silicato de sódio. Foram, também, realizadas pastas híbridas com as cinzas volantes e um ligante hidráulico, o cimento Portland CEM I 42,5 R.

Os ativadores foram dissolvidos e preparados antecipadamente (arrefecidos à temperatura ambiente) à mistura e foram misturados à posterior com os precursores e restantes constituintes. No fabrico das pastas e argamassas, usou-se uma misturadora normalizada de acordo com o descrito na NP EN 196 1. Na realização dos provetes das pastas foram usados moldes 20x20x20 mm³ e no caso das argamassas a dimensões dos moldes foi de 40x40x160 mm³.

O programa de cálculo estatístico além de fornecer para cada MAA a MC, como se verifica na Figura 1, também serviu para analisar estatisticamente as resistências mecânicas, aplicando a metodologia de superfície de resposta (MSR) (ver Figura 2), permitindo, assim, definir as composições mais eficazes e apoiar adequadamente a tomada de decisões ao longo do processo. A MSR auxiliou para otimizar as proporções molares de SiO₂/Al₂O₃ e Na₂O/SiO₂, relacionando as resistências mecânicas à compressão aos 7 e aos 28 dias de idade, de forma a determinar o ponto ótimo das proporções molares e da

resistência mecânica [7].

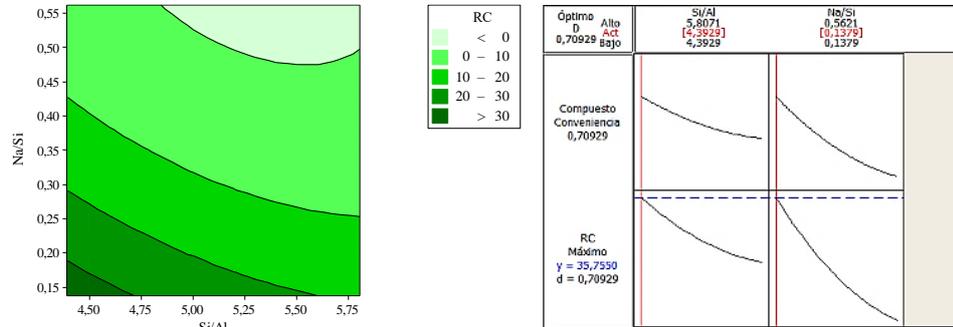


Figura 2. Resultado da resistência mecânica aos 28 dias e otimização da MC para a CV.

Todo o processo de otimização foi realizado com pastas para todas as MAA. Deste processo resultaram as misturas otimizadas para cada precursor e a mistura híbrida (MH), tal como se mostra na Tabela 1.

Tabela 1. Composição das MAA (traço em massa %).

Composição (massa %)	Ativado c/sódio		
	CV	70%CV+30%Mk	80%CV+20%CEM
Cinza Volante	100	70	80
Metacaulino	-	30	-
CEM I 42,5 R	-	-	20
Silicato (Na)	47,5	54,4	39,7
Hidróxido (Na)	6,9	2,8	9,6
Rácios Molares			
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	5,1	4,1	5,2
Na ₂ O/SiO ₂	0,1	0,1	0,2
Líquidos/Sólidos		0,3	
Na ₂ O/Al ₂ O ₃	0,7	0,4	1
Temperatura de cura (°C)	50	50	20

A elaboração das argamassas foi feita com base nas pastas otimizadas, utilizando-se uma dosagem de areia correspondente ao traço 1:3, ou seja, para uma parte de pasta MAA juntaram-se 3 partes de areia. A quantidade de água da argamassa foi otimizada aquando da realização da argamassa 100%CV de forma a obter um espalhamento no intervalo de 140-160 mm. Foram produzidas 3 argamassas distintas: 100%CV em que o percussor foi constituído apenas por CV; 70%CV+30%Mk em que o percussor foi constituído por 70% de CV e 30% de Mk; e uma argamassa híbrida (0,8CV+0,2CEM) constituída por uma mistura de 80% MAA 100%CV e 20% de cimento.

O ensaio de consistência foi determinado de acordo com a norma EN 1015-3 (1999) [8].

A consistência das argamassas ativadas alcalinamente apresentou um diâmetro de espalhamento médio de 140 mm, resultado obtido com uma razão A/L de 0,3. A moldagem foi realizada sem problemas, sendo que, este resultado apresenta um valor de consistência idêntico ao das argamassas de reboco, de classe GP com base na norma NP EN 998-1 [9] e serviu como referência às restantes MAA.



Figura 3. Otimização do espalhamento da argamassa 100%CV (valor médio de 140 mm).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resistências Mecânicas

Após a elaboração das argamassas, procedeu-se à caracterização das resistências mecânicas, flexão e compressão, com base na norma NP EN 1015-11 [10] aos 7 e 28 dias de idade. Na Figura 4, podem-se observar os resultados mecânicos para as diferentes misturas de argamassas ativadas alcalinamente, com base na otimização das pastas e segundo a metodologia MSR.

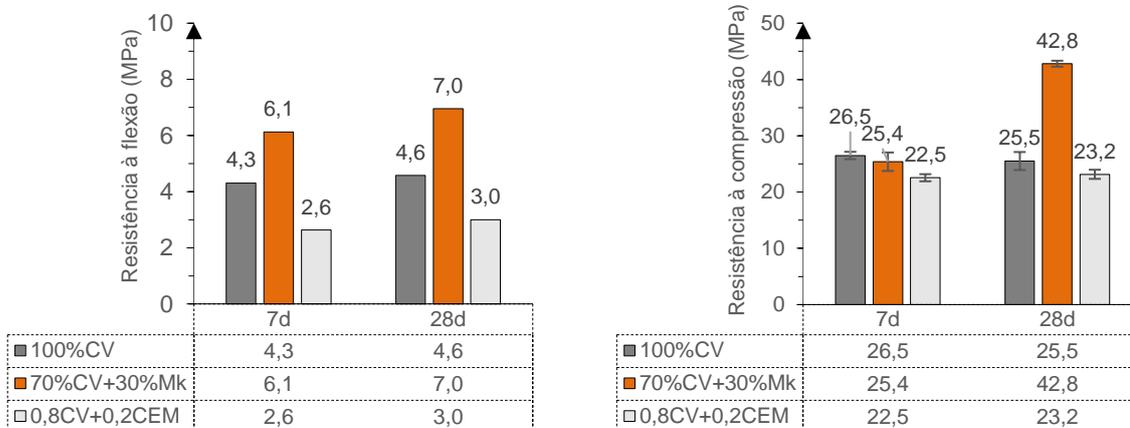


Figura 4. Resultados das resistências mecânicas aos 7 e 28 dias das argamassas ativadas alcalinamente.

Os resultados na Figura 4 mostram que a mistura 70%CV+30%Mk obteve aos 28 dias de idade os valores mais elevados, para a flexão (6,1 MPa) e compressão (42,8 MPa), enquanto a mistura híbrida (MH) obteve os valores inferiores a todas as misturas tanto aos 7 e 28 dias de idade. A mistura de 100%CV e a MH tiveram, para ambas idades, valores inferiores aos da mistura binária (70%CV+30%Mk), tanto na flexão como na compressão.

3.2 Estabilidade à água

Os três tipos de MAA foram submetidas ao ensaio de estabilidade à água. Quando as MAA atingiram

um tempo de cura de 28 dias, os provetes correspondentes a cada tipo de mistura foram totalmente submersos em água durante 28 dias, perfazendo à data de ensaio uma idade de 56 dias.

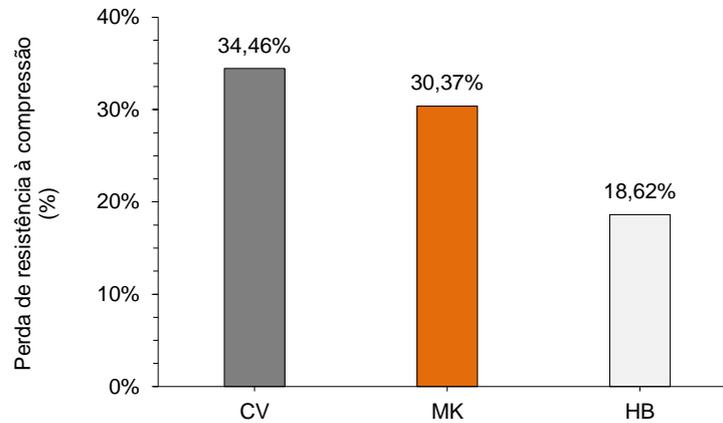


Figura 5. Resultados das resistências mecânicas aos 7 e 28 dias das argamassas ativadas alcalinamente.

Após a imersão durante 28 dias de idade não foram observados quaisquer danos nos provetes de cada mistura. Na Figura 5 podemos comprovar que a MH teve o melhor desempenho na estabilização à água, perdendo apenas 18,62% da resistência mecânica à compressão, enquanto as MAA com o precursores CV e Mk perderam mais do que 30% de resistência à compressão.

3.3 Índice de atividade

O ensaio do índice de atividade realizou-se segundo a norma NP EN 450-1 [11], consistiu na substituição de 25 % do cimento pelos diferentes precursores, concretizando os ensaios de resistência mecânica aos 28 dias de idade, excluindo os dos 90 dias de idade. A Tabela 2 representa o valor médio dos três provetes ensaiados contendo os resultados da tensão de rotura (MPa), desvio padrão (MPa), coeficiente de variação (%) e a perda de resistência (%). Os resultados do índice de atividade aos 28 dias mostram que todos os materiais estudados apresentaram valores de resistência à compressão inferiores aos da argamassa padrão.

Tabela 2. Resultados do índice de atividade aos 28 dias de idade dos diferentes precursores.

Misturas	Tempo de cura (dias)	Resistência compressão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)	Perda de resistência (%)
Ref		42,44	1,51	3,56%	0,00%
100%CV	28	36,94	2,35	6,36%	12,96%
70%CV+30%Mk		41,14	1,81	4,40%	3,06%

A realização deste ensaio conduziu aos resultados apresentados anteriormente, indicando que a argamassa composta por 75% de cimento e 25% de metacaulino obteve um desempenho idêntico ao da de referência, aos 28 dias idade. Ambas as substituições dos diferentes precursores pelo ligante apresentaram resultados satisfatórios, cumprindo o indicado na norma aos 28 dias de idade, tendo o índice de atividade das CV e do Mk superado os 75%. Com base nos resultados obtidos, verificou-se que as cinzas volantes produzidas na Central Termo Elétrica do Pego, em Portugal e o metacaulino

produzido em Barqueiros, Portugal, podem ser considerados pozolânicos e podem ser usados em argamassas e betões.

3.4 Desempenho das MAA a elevada temperatura

O betão não é um material que resiste bem a elevadas temperaturas. Vários incêndios com uma elevada grandeza aconteceram no passado [11], dos quais resultaram grandes danos estruturais e perdas de vida, facto este que justifica a necessidade de desenvolver novos materiais com desempenho mecânico ao fogo superior ao do betão convencional e de outros materiais de construção [12].

O estudo visa avaliar novas alternativas ao betão corrente com as MAA propostas. O ensaio consistiu em estudar as argamassas ativadas alcalinamente, quando sujeitas a elevadas temperaturas, nomeadamente, temperatura ambiente, 300 °C, 500 °C e 700 °C. Após as argamassas submetidas a temperaturas elevadas, os provetes foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão e comparados com os resultados dos MAA sem estarem sujeitas às elevadas temperaturas. Os resultados dos ensaios encontram-se resumidos na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados do índice de atividade aos 28 dias de idade dos diferentes precursores.

Mistura	Nº da Mistura	Temperatura (°C)	Tempo de cura (dias)	Resistência compressão (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)	% de resistência
REF	1	T. Ambiente	28	26,03	1,26	4,84%	100%
100%CV	2			23,23	0,62	2,69%	100%
70%CV+30%Mk	3			42,71	0,34	0,78%	100%
0,8CV+0,2CEM	4			23,63	0,80	3,37%	100%
REF	5	300		21,17	0,08	0,37%	81%
100%CV	6			14,64	0,52	3,53%	63%
70%CV+30%Mk	7			26,36	1,73	6,58%	62%
0,8CV+0,2CEM	8			8,63	0,36	4,13%	37%
REF	9	500		13,58	0,36	2,64%	52%
100%CV	10			14,17	0,42	2,95%	61%
70%CV+30%Mk	11			24,83	2,79	11,23%	58%
0,8CV+0,2CEM	12			16,50	0,55	3,31%	70%
REF	13	700		12,19	1,26	4,84%	47%
100%CV	14			20,27	1,00	4,94%	87%
70%CV+30%Mk	15			14,39	0,82	5,71%	34%
0,8CV+0,2CEM	16			17,38	0,66	3,80%	74%

Com base nos resultados obtidos é possível afirmar que a argamassa que melhor desempenho teve a diferentes temperaturas, até aos 700 °C, foi a argamassa constituída por 70%CV+30%MK, verificando-se que apenas aos 700 °C é que obteve uma resistência inferior às outras.

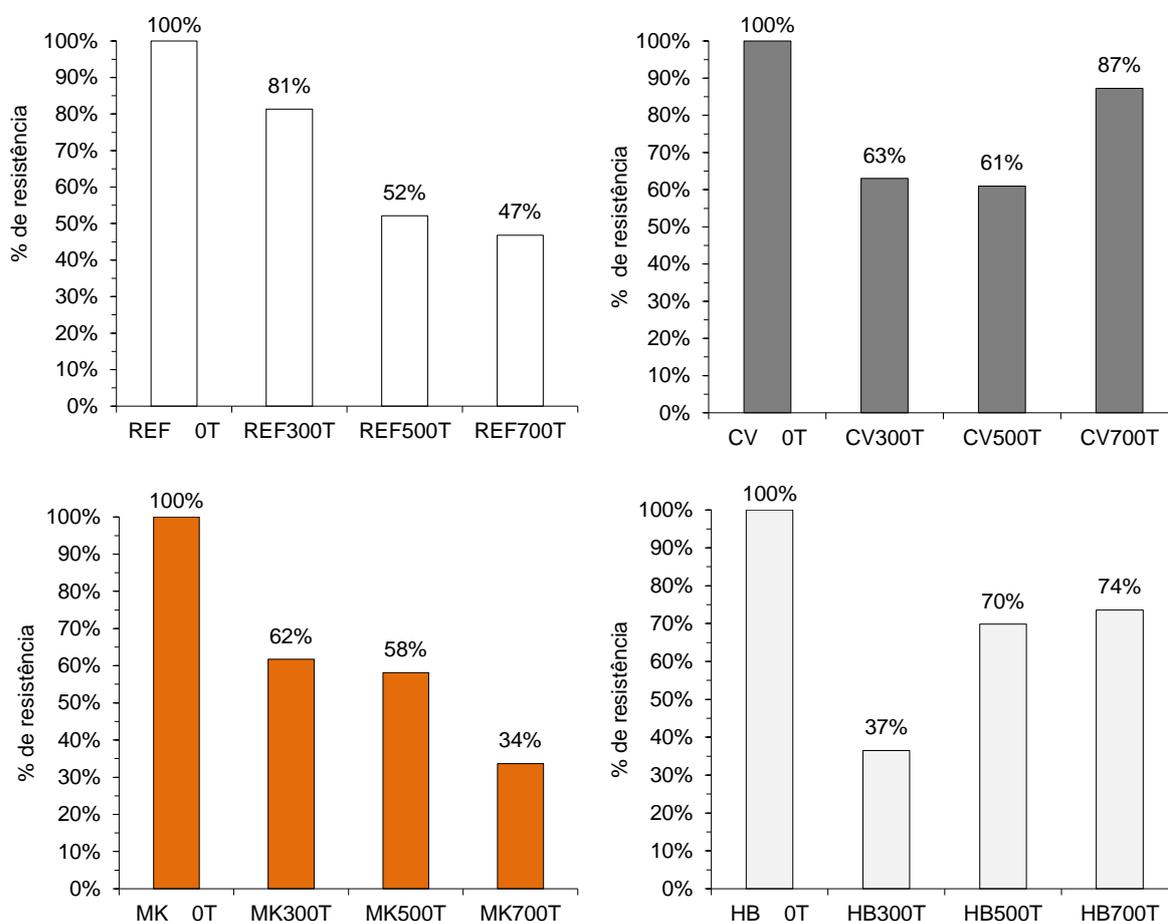


Figura 6. Avaliação e desempenho da resistência à compressão das argamassas ativadas alcalinamente e da argamassa de referência, quando exposta a diferentes temperaturas.

Na Figura 6, tanto as misturas de referência como as de argamassas ativadas alcalinamente de metacaulino tiveram um declínio da resistência mecânica à compressão à medida que a temperatura aumentou, verificando-se que, nas restantes misturas, 100%CV e 0,8CV+0,2CEM, não aconteceu esse decréscimo de resistência.

No caso da da mistura 100%CV, verifica-se uma estabilização dos valores da resistência mecânica entre a temperatura de 300 °C e de 500 °C, na ordem dos 60%. Possivelmente não houve dano muito avultado ou uma alteração muito grande da microestrutura nesse intervalo de temperatura. No entanto, verificou-se uma perda menor à temperatura de 700 °C, de apenas 13%. Provavelmente a microestrutura ficou com dano menor devido a uma possível recristalização. Este facto pode dever-se ao alto teor de álcalis presente no material, pois os álcalis favorecem a formação de uma fase fundida a altas temperaturas (600 a 700 °C). A solidificação dessa fase fundida durante o processo de arrefecimento pode explicar a alta resistência à compressão da MAA com cinzas volantes tratadas termicamente e arrefecidas.

Na mistura 70%CV+30%MK foi possível verificar que a perda de resistência aumentou consoante a temperatura subiu. No entanto, teve o mesmo comportamento que a argamassa de referência, mas

com valores mais elevados da resistência à compressão.

Como se verificou na argamassa de 100% de cinzas volantes, a argamassa composta por 80% de CV e 20% de cimento também apresentou uma perda de resistência e depois, a uma temperatura mais elevada, um ganho de resistência. Esta situação deu-se devido à solidificação do material fundido quando este está na fase de arrefecimento.

3.5 Absorção por Imersão e Capilaridade

O ensaio estudou a absorção por imersão das argamassas ativadas alcalinamente e da argamassa de referência, antes e depois de sujeitas a elevada temperatura. O ensaio possibilitou a determinação do aumento de poros devido às elevadas temperaturas que as argamassas foram sujeitas. Na Figura 7 são apresentados os resultados globais da absorção de água por imersão.

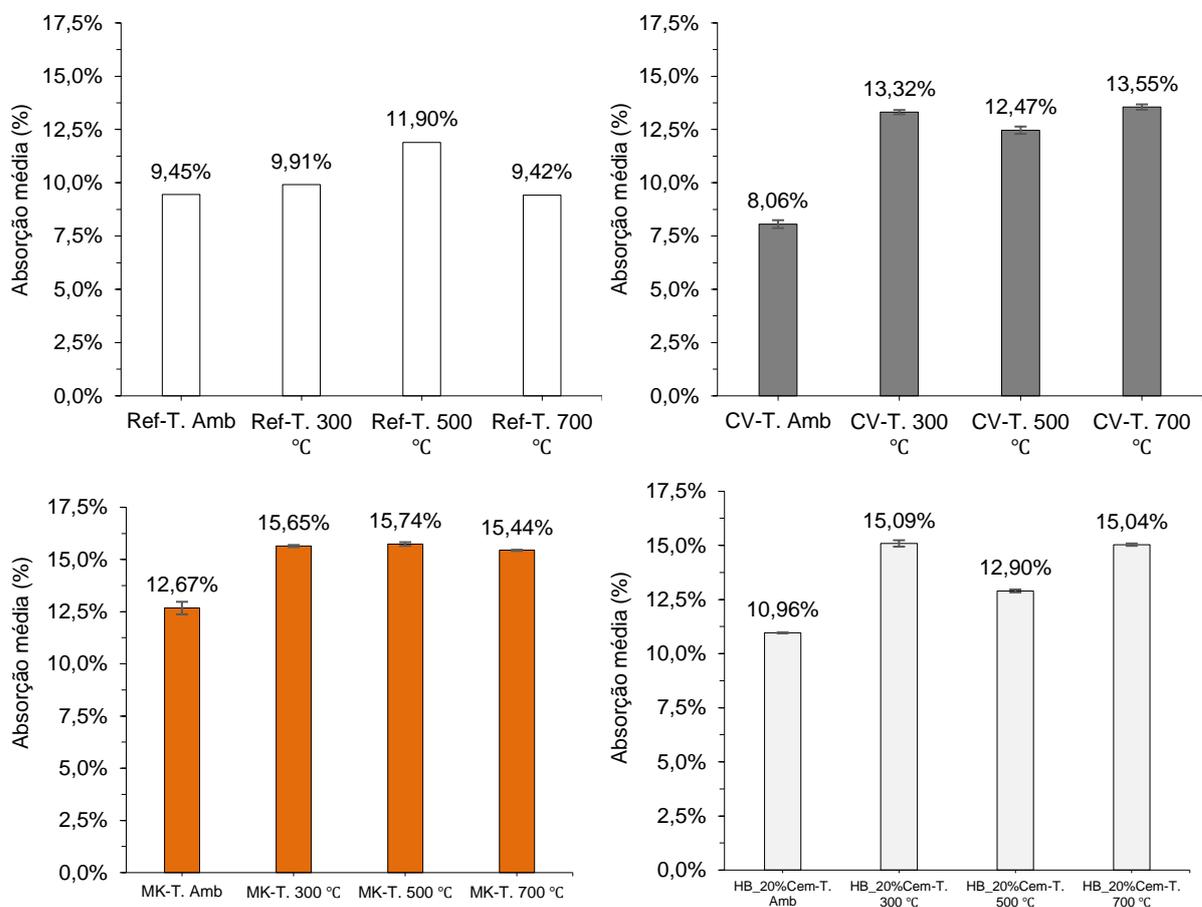


Figura 7. Absorção por imersão aos 28 dias de idade das argamassas ativadas alcalinamente.

Na Figura 7 verifica-se, para todas as misturas, que à medida que a temperatura aumenta a matriz porosa também aumenta. A mistura de referência ao longo do aumento da temperatura não sofreu grande variação de porosidade aberta, ao contrário das restantes misturas. As misturas 100%CV, 70%CV+30%Mk e 0,8CV+0,2CEM, para as elevadas temperaturas tem em média uma porosidade aberta compreendida num intervalo de 13% a 15%.

Foi estudado o comportamento da absorção por capilaridade das diferentes misturas ativadas alcalinamente não submetidas a temperaturas elevadas, como mostrado na Figura 8, verificando-se maior coeficiente de capilaridade para a mistura híbrida e menor para a 70%CV+30%Mk.

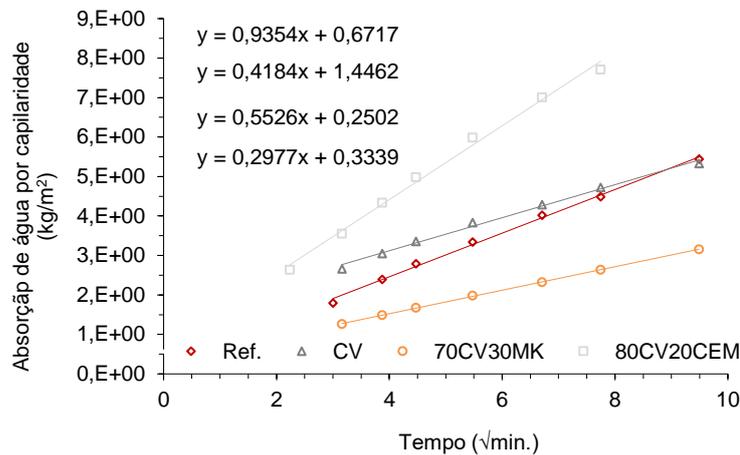


Figura 8. Absorção por capilaridade aos 28 dias de idade das argamassas ativadas alcalinamente.

4. CONCLUSÕES

A realização deste estudo teve como objetivo a otimização de pastas e argamassas ativadas alcalinamente. O processo de otimização das pastas permitiu determinar as misturas com melhor desempenho à compressão, segundo a superfície de resposta realizada. O processo de otimização permitiu determinar as 3 misturas ótimas (100%CV, 70%CV+30%MK e 0,8CV+0,2CEM) com uma variação de utilização de percussores locais e ativadores.

A pasta fabricada com 100%CV obteve o melhor desempenho, com uma temperatura de cura de 50 °C e uma resistência à compressão na ordem dos 45 MPa.

O desempenho à compressão das argamassas ativadas alcalinamente quando comparado com as de referência, demonstrou que aos 28 dias de idade as argamassas compostas por 100%CV e híbridas têm uma resistência mais baixa do que a de referência na ordem dos 10%, correspondente a 3 MPa, enquanto que a argamassa composta por 70%CV+30%MK tem um desempenho bastante superior, tendo sido registrados cerca de 45 MPa.

O estudo da estabilidade à água das argamassas ativadas alcalinamente demonstrou que perdem resistência, em média cerca de 40% da resistência à compressão inicial. A perda da resistência pode dever-se a diversos fatores. Uma possível causa está relacionada com a eventual formação de fases solúveis a partir do silicato adicionado, que no estado seco contribuem para a resistência e, quando os provetes são imersos em água, são lixiviadas, contribuindo, assim, para uma diminuição da resistência. Outra causa possível está relacionada com uma possível patologia ou fenômeno de fissuração devido a uma variação volumétrica após secagem dos provetes. Neste contexto, justifica-se aprofundar o estudo num futuro próximo e tentar determinar as causas da perda da resistência, com uma pesquisa desenvolvida sobre o assunto com este tipo de MAA.

As argamassas ativadas alcalinamente apresentaram resultados mais estáveis do que as argamassas de referência quando sujeitas a temperaturas elevadas. Enquanto que o aumento de temperatura nas argamassas de referência proporcionou uma diminuição gradual da resistência à compressão, nas argamassas ativadas alcalinamente existiu, também, uma diminuição de resistência. Porém, os alcalis

presentes favorecem a formação de uma fase fundida a altas temperaturas. A solidificação desta fase fundida durante o processo de arrefecimento faz com que aumente a resistência das pastas e argamassas. A resistência das argamassas ativadas alcalinamente após a segunda solidificação nunca ultrapassa a resistência à temperatura ambiente.

Os aumentos de resistência foram verificados na argamassa de 100%CV e na argamassa híbrida. O aumento de resistência de argamassa 100%CV deu-se aos 700 °C, onde se registou 87% da sua resistência à temperatura ambiente, sendo que esta aos 500 °C apenas tinha 61% da resistência à compressão inicial. A argamassa híbrida teve um aumento de resistência à compressão quando foram atingidos os 500 °C, tendo-se verificado um aumento de resistência à compressão de 37% aos 300 °C para 70% aos 500 °C. A argamassa composta por 70%CV+30%Mk não obteve qualquer aumento de resistência com o aumento da temperatura, podendo este acontecimento ter ocorrido devido a uma escassez de alcalis na argamassa ou, então, devido ao varrimento de poucas temperaturas pois essa reação pode dar-se até aos 1000 °C.

A porosidade das argamassas é um dos fatores que influencia a sua capacidade de absorção por capilares e por imersão. No estudo verificou-se uma porosidade média diferente em cada tipo de argamassa, sendo que, a argamassa de referência apresentou uma porosidade aberta média de cerca de 9.45%, a argamassa 100% CV obteve 8.06%, a argamassa 70%CV+30%MK obteve 12.67% e por fim a a argamassa híbrida atingiu 10.96%.

Em suma, foi cumprido o objetivo no estudo, estabelecendo uma resistência à compressão para um intervalo de 20 a 50 MPa, sendo que todas as pastas e argamassas otimizadas cumpriram com as metas consideradas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por Fundos Nacionais através da FCT/MCTES – Fundação para a Ciência e Tecnologia/Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, no âmbito do CTAC – Centro de Território, Ambiente e Construção – UIDB/0407/2020.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Mindess, *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*. Woodhead Publishing, 2019.
- [2] M. Lahoti, K. H. Tan, and E.-H. Yang, “A critical review of geopolymers for structural fire-resistance applications,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 221, pp. 514–526, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.076>.
- [3] J. Torgal, F.; Said, *Considerações sobre a Sustentabilidade dos Materiais de Construção*. 2010.
- [4] M. T. Carrasco and F. Puertas, “Reutilización de residuos vítreos urbanos e industriales en la fabricación de cementos alcalinos. Activación, comportamiento y durabilidad,” 2015.
- [5] A. Fernández-Jiménez, N. Cristelo, T. Miranda, and Á. Palomo, “Sustainable alkali activated materials: Precursor and activator derived from industrial wastes,” *J. Clean. Prod.*, vol. 162, pp. 1200–1209, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.151>.
- [6] W. G. Valencia Saavedra and R. Mejía de Gutiérrez, “Performance of geopolymer concrete composed of fly ash after exposure to elevated temperatures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 229–235, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.208>.
- [7] J. F. Rivera, N. Cristelo, A. Fernández-Jiménez, and R. Mejía de Gutiérrez, “Synthesis of alkaline cements based on fly ash and metallurgical slag: Optimisation of the SiO₂/Al₂O₃ and

- Na₂O/SiO₂ molar ratios using the response surface methodology,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 213, pp. 424–433, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.097>.
- [8] E. Standard, “E. Standard EN 1015-3 - Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table),” no. February 1999, 2004.
- [9] NP EN 998-1, “Especificações de argamassas para alvenarias. Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores,” 2010.
- [10] BSI, “EN 1015-11:2019 - Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.” British Standards Institution, London, 2019.
- [11] K. Sakkas, P. Nomikos, A. Sofianos, and D. Pantias, “Slag based geopolymer for passive fire protection of tunnels,” *Underground. W. to Futur. UK Ltd.*, pp. 343–349, 2013.
- [12] J. L. Provis and J. S. J. Van Deventer, *Geopolymers: Structures, processing, properties and industrial applications*. 2009. doi: 10.1016/0375-9601(81)90388-1.

Salvador, Brasil

9 a 11 de novembro de 2022

4º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS

Anais do Evento

ISBN: 978-65-00-55912-5



Editores

Paulo Roberto Lopes Lima

Cintia Maria Ariani Fontes

Geraldo José Belmonte dos Santos

Daniel Veras Ribeiro

.: FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de
Construção Sustentáveis (4. : 2022 : Salvador,
BA)
Anais do evento 4º Congresso Luso-Brasileiro de
Materiais de Construção Sustentáveis [livro
eletrônico] / editores Paulo Roberto Lopes Lima...
[et al.]. -- 1. ed. -- Feira de Santana, BA :
Ed. dos Autores, 2022.
PDF.

Vários autores.

Outros editores: Cintia Maria Ariani Fontes,
Geraldo José Belmonte dos Santos, Daniel Veras
Ribeiro.

Bibliografia.

ISBN 978-65-00-55912-5

1. Engenharia civil 2. Construção - Planejamento
e controle 3. Construção - Projetos 4. Inovação
tecnológica 5. Materiais de construção
6. Sustentabilidade I. Lima, Paulo Roberto Lopes.
II. Fontes, Cintia Maria Ariani. III. Santos,
Geraldo José Belmonte dos. IV. Ribeiro, Daniel
Veras.

22-134518

CDD-624

Índices para catálogo sistemático:

1. Construção civil : Engenharia 624

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129



Código de barras dos Anais