ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Calorimetria isotérmica em geopolímeros binários de resíduos de construção e demolição

Isothermal calorimetry in binary geopolymers from construction and demolition waste

André Guilherme Martins Costa
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais| Belo Horizonte | Brasil | andreguimcosta@gmail.com
Augusto Cesar da Silva Bezerra
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais| Belo Horizonte | Brasil | augustobezerra@cefetmg.br
Flávia Müller Grigoleto
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais| Belo Horizonte | Brasil | grigoletoflavia@gmail.com

Resumo

Neste estudo foram investigadas as interações termodinâmicas e a formação de fases em sistemas geopoliméricos, compostos por resíduos de construção e demolição, e também, escória de alto-forno e metacaulim como materiais complementares. Para isso, utilizou-se a calorimetria isotérmica, uma técnica que mede as variações de energia em um sistema em temperatura constante. Os resíduos de construção e demolição utilizados foram os de cimento e tijolos, além do metacaulim e da escória de alto-forno. Foram preparadas diferentes misturas desses materiais e submetidas a ensaios com duração de 168 horas, mantendo-se a temperatura constante em 23ºC. O ativador alcalino utilizado foi o hidróxido de sódio (NaOH). Através das calorimetrias realizadas, em sua maioria foi possível observar reações exotérmicas em algumas misturas. Em outros casos, foram observados decaimentos significativos de energia, indicando reações endotérmicas. Essas variações de energia afetam diretamente as formas como as reações ocorrem e as propriedades dos materiais resultantes. Ao longo do estudo, observou-se que a escória granulada de alto-forno obteve melhor potencial energético, devido a sua composição química com teores adequados de alumino-silicatos e CaO. De uma forma geral, a calorimetria isotérmica se mostrou uma ferramenta eficaz para estudar as interações termodinâmicas em sistemas compostos por resíduos de construção e demolição.

Palavras-chave: Calorimetria isotérmica. Resíduos de construção e demolição. Escória de alto-forno. Ativador alcalino.

Abstract

In this study, thermodynamic interactions and phase formation in geopolymeric systems composed of construction and demolition waste, and also blast furnace slag and metakaolin as complementary materials, were investigated. For this purpose, isothermal calorimetry was used, a technique that measures energy variations in a system at constant temperature. The

Como citar:
COSTA, André Guilherme Martins; BEZERRA, Augusto Cesar da Silva; GRIGOLETO, Flávia Müller. Calorimetria isotérmica em geopolímeros binários de resíduos de construção e demolição. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

construction and demolition waste used was cement and bricks, in addition to metakaolin and blast furnace slag. Different mixtures of these materials were prepared and subjected to tests lasting 168 hours, maintaining a constant temperature of 23ºC. The alkaline activator used was sodium hydroxide (NaOH). Through the calorimetry performed, it was possible to observe exothermic reactions in most mixtures. In other cases, significant energy decays were observed, indicating endothermic reactions. These energy variations directly affect the way in which the reactions occur and the properties of the resulting materials. Throughout the study, it was observed that granulated blast furnace slag obtained better energy potential, due to its chemical composition with adequate levels of aluminosilicates and CaO. In general, isothermal calorimetry proved to be an effective tool for studying thermodynamic interactions in systems composed of construction and demolition waste.

Keywords: Isothermal calorimetry. Construction and demolition waste. Blast furnace slag. Alkaline activator.

INTRODUÇÃO

O cimento Portland é o material mais utilizado na sociedade moderna, entretanto, sua elevada emissão de gases poluentes traz cada vez mais danos ao meio ambiente, tornando-se uma problemática mundial. Com base nisso, o desenvolvimento de materiais álcali-ativados a base de resíduos de construção e demolição (RCD) vermelho e cinza, e escória de alto-forno se tornou uma opção sustentável, a fim de diminuir os efeitos ambientais negativos gerados com a produção do cimento, aliado ao reaproveitamento de resíduos que na maioria dos casos são descartados pela indústria [1].

Com base nisso, os RCD são materiais cada vez mais produzidos no Brasil, porém sem um eficiente reaproveitamento. Esses materiais são potenciais álcali-ativados (AA), que proporcionam propriedades ideais de resistência mecânica e durabilidade para a substituição de produtos tradicionais a base de clínquer, como o cimento Portland. São materiais a base de aluminossilicatos, que interagem com ativadores a base de sódio ou potássio e possibilitam a produção de pastas com elevada durabilidade e resistência, podendo alcançar ou superar as propriedades já entendidas nos materiais cimentícios tradicionais [1, 2].

A partir disso, uma vez que a produção de materiais álcali-ativados se torna uma realidade, é importante utilizar técnicas que avaliem a reatividade entre os materiais, de modo que haja menor consumo de tempo e reagentes, e que tal avaliação esteja ligada às propriedades de resistência mecânica e formação de ligações. A calorimetria é uma técnica fundamental pois permite quantificar a energia das reações entre resíduo precursor e o ativador, já que a taxa de calor interfere diretamente nas propriedades intrínsecas às aplicações desses materiais. Devido a substituição do cimento Portland pelos materiais AA, é necessário entender os processos de hidratação do cimento e de ativação dos AA, e consequentemente, avaliar o ganho de resistência ao longo dos dias e dos mecanismos de endurecimento desses materiais [3].

Por meio disso, a análise calorimétrica se torna fundamental para a medição da taxa térmica de reação das misturas, e além disso, permite prever e monitorar os mecanismos de potencial térmico. Aliado a isso, a fim de desenvolver novos materiais mais sustentáveis, duráveis e resistentes, este trabalho tem como intenção a análise da calorimetria isotérmica de materiais álcali-ativados a base de resíduos de construção e demolição, além da escória de alto-forno e metacaulim como referência [3].

MATERIAIS E MÉTODOS

MATERIAIS

Os materiais precursores utilizados foram: pó de resíduo cimentício (PRC), pó de resíduo de tijolos (PRT), metacaulim (MK), e a escória granulada de alto-forno (EGAF). Tais precursores foram escolhidos pois são resíduos gerados que, normalmente, não possuem destinação adequada. [1]

O PRC, exclusivamente, foi produzido em laboratório a partir da utilização de cimento Portland tipo V (CPV) da marca Cimento Nacional, com razão entre água destilada e cimento igual a 0,45, e curado por 28 dias em submersão em água com cal (CaO). Houve cominuição dos corpos de prova que se deu pela britagem em britador de mandíbula, seguido pela moagem em moinho de bolas com 5 ciclos de 2 horas cada. Nesse processo, foram utilizadas 88 esferas de alumina com frequência de 60rpm. Por fim, houve a secagem em estufa a 100ºC ± 5ºC em um período de 24h, e a pesagem do material obtido.

O PRT foi produzido com a cominuição de tijolos cerâmicos, que se passaram pela britagem em britador de mandíbulas e secagem em estufa a 100ºC ± 5ºC. Por fim, moagem em moinho de bolas com 90 esferas de aço cromo em rotação de 90rpm, com 5 ciclos de 2 horas cada, garantindo a granulometria desejada.

O MK foi adquirido pela empresa Metacaulim do Brasil, de Jundiaí, São Paulo. O material passou por secagem e teve sua granulometria avaliada.

A EGAF foi adquirida pela empresa Supermix Concreto. O material passou por secagem e moagem em moinho de bolas, com as mesmas condições de moagem que o PRT, entretanto com período de 8 horas.

Para a ativação dos precursores utilizou-se o Hidróxido de Sódio (NaOH) P.A. 97% em micropérolas com massa molar de 40,00g, obtido pelas empresas Neon Química e Sulfal Química. A relação em massa de ativador/precursor foi de 0,55, com concentração final de 8M. O método de mistura adotado foi o *two-part*, em que os precursores sólidos foram ativados com a solução alcalina já solubilizada em água destilada.

A Tabela 1 apresenta a composição química dos precursores a partir da técnica de Fluorescência de Raios X (FRX) com o equipamento Bruker, modelo S2 Ranger. A Tabela 2 identifica a granulometria dos precursores por meio do Cilas 1090 Laser Particle Size Analyzer.

Foi realizado o ensaio de Difração de Raios X (DRX) com o equipamento SHIMADZU XRD - 7000, com passo de 0,02 ente os ângulos 5° até 80°, com radiação Cu e voltagem de 40kV e corrente de 30 mA. A velocidade usada foi de 2° por minuto. Tal ensaio é fundamental para analisar a formação, ou não, de fases cristalinas nos compostos, e, portanto, avaliar o comportamento calorimétrico em função dos arranjos atômicos.

MÉTODOS

A mistura foi realizada em argamassadeira adicionando os precursores em suas devidas proporções, como indica a Tabela 3, e logo após a solução alcalina. As composições foram fracionadas, variando entre 75% e 25% para cada traço de precursor. Por exemplo, a mistura PRT25 PRC75 possui 25% de PRC e 75% de PRC, já o traço PRT50 PRC50 possui 50% de PRT e 50% de PRC na sua composição, devidamente ativado com o NaOH. Portanto, considera-se que são combinações binárias devido a

presença de 2 precursores. Para garantir a mistura completa, foi realizado um ciclo lento de rotação da pá da argamassadeira por 2 minutos e um ciclo rápido de 1 minuto para cada traço.

Tabela 1: Composição química dos precursores

Composição	PRT (%)	PRC (%)	MK (%)	EGAF (%)
SiO_2	65,90	12,67	62,00	32,05
K_2O	2,54	-	0,49	0,17
Fe_2O_3	7,19	4,42	2,51	1,27
CaO	0,28	75,67	0,02	39,46
Al_2O_3	21,86	2,55	30,55	14,33
P_2O_5	0,11	-	0,01	0,01
TiO_2	0,57	0,34	1,45	0,53
Na_2O	0,66	-	0,10	0,96
SO_3	0,13	2,63	-	1,43
MgO	0,64	-	0,25	8,77
Outros óxidos	0,12	1,72	2,62	1,02
PF	2,5	14	2,44	0,18

Fonte: o autor

Tabela 2: Distribuição granulométrica dos precursores

Tamanhos	PRT (µm)	PRC (µm)	MK (µm)	EGAF (µm)
D_m	17,91	11,33	23,27	22,92
D_{10}	1,95	1,46	3,01	1,75
D_{50}	9,42	6,45	20,09	15,78
D_{90}	49,22	31,17	48,20	55,10

Fonte: o autor

Tabela 3: Combinações de misturas de precursores

Número da mistura	Composição
1	PRT 100
2	PRC 100
3	MK 100
4	EGAF 100
5	PRT25 PRC75
6	PRT50 PRC50
7	PRT75 PRC25
8	PRT25 MK75
9	PRT50 MK50
10	PRT75 MK25
11	PRT25 EGAF75
12	PRT50 EGAF50
13	PRT75 EGAF25
14	PRC25 MK75
15	PRC50 MK50
16	PRC75 MK25

Fonte: o autor

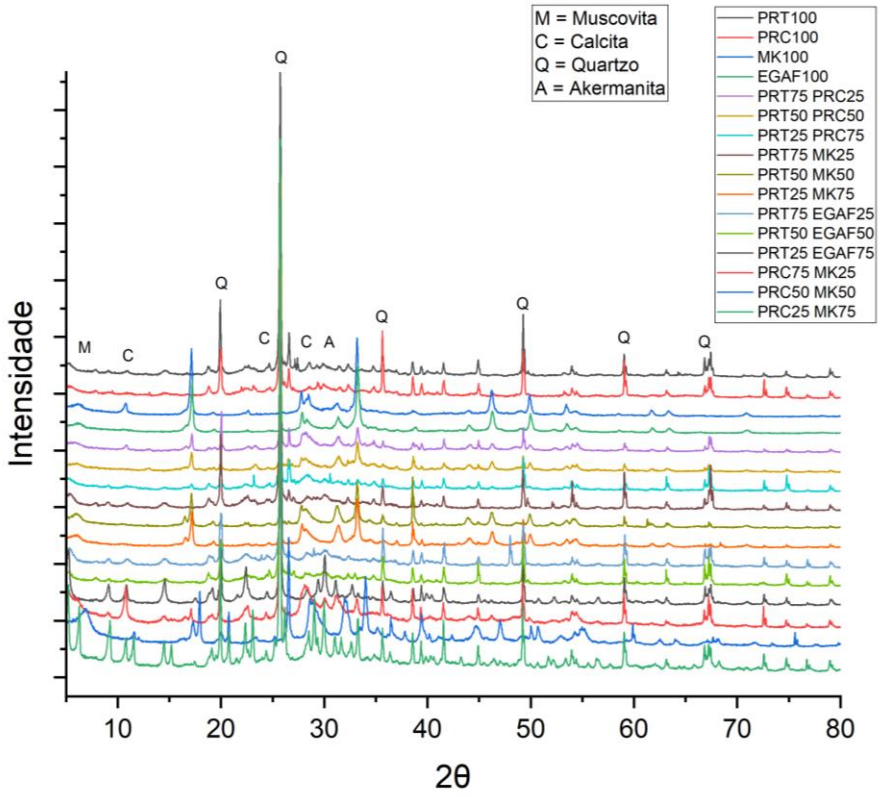
A Tabela 3 secciona os materiais em grupos que serão avaliados de acordo com a variação de composição. O primeiro grupo dos precursores ativados identificou as diferenças de comportamentos das principais composições. Os grupos a seguir são apenas variações de proporções para cada traço de pasta produzida.

A técnica de calorimetria isotérmica foi realizada com o equipamento Calmetrix I-Cal2000 HPC. Cada análise teve duração de 168 horas com temperatura constante de 23ºC, simulando a temperatura ambiente. A mistura entre ativador e precursor foi realizada no próprio calorímetro, com rotação do misturador em duas sequências, a primeira com 20 ciclos de 360° e a segunda com 20 ciclos de 180°, respectivamente, com velocidade de 200rpm.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 apresenta os picos de rede cristalina dos compostos químicos identificados na composição das pastas produzidas por meio da técnica de DRX.

Figura 1: Difração da rede cristalina por meio de Difração de Raios X



Fonte: o autor

Os resultados de calorimetria estão dispostos em dois gráficos para cada análise de grupo de materiais. O primeiro (a) se refere ao fluxo de calor em todo o tempo de ensaio, dado em W/g de material. Neste mesmo gráfico, foi retratada uma aproximação dos dados em até 24 horas para todos esses resultados, que permite avaliar os primeiros momentos de reações em que se costuma observá-las com mais intensidade. O segundo gráfico (b) se refere ao calor acumulado em J/g de material ao longo do tempo.

PRECURSORES ATIVADOS

Como observado na Figura 1 com os resultados de DRX das amostras, é possível indicar o halo entre 28° e 30° pode indicar a presença de géis amorfos nas estruturas dos precursores ativados. Não apenas deles, mas todas as outras pastas também

apresentam, uma vez que a interação entre precursores também pode ocasionar na formação destes géis, conhecidos em geopolímeros. [11]

Para todos os casos, observam-se reações exotérmicas predominantemente. Um pico estreito e acentuado nos primeiros instantes de ensaio se desenvolve com as primeiras reações realizadas, uma vez que evidencia a ativação dos geopolímeros com a dissolução de OH- nas ligações de aluminossilicatos, principalmente para PRT, MK e EGAF que possuem mais teores de SiO_2 e Al_2O_3. Como visto na Figura 2a, esses mesmos precursores apresentaram um pico exotérmico inicial maior, o que justificam as reações com os óxidos dos precursores e as hidroxilas do ativador sendo realizadas, enquanto as reações com PRC foram mais amenas nesse período [4].

Esse pico inicial é bastante similar ao que é observado na hidratação do cimento, entretanto, com reações entre diferentes componentes e intensidades de ligações [5].

A evolução de calor acumulado, observado na Figura 2b, é marcada principalmente pela EGAF que tem crescimento gradativo ao longo do tempo, podendo garantir uma melhoria em suas propriedades, principalmente a sua resistência mecânica e durabilidade que se desenvolvem.

Materiais com baixo teor de CaO, neste caso o PRT e o MK, apresentam baixas taxas de reações exotérmicas em tempos mais longos, sendo possível analisar faixas endotérmicas a partir de 155 horas para o PRT e 81 horas para o MK. Isso porque este óxido garante menor energia de ativação das reações e maior velocidade para que elas ocorram [6].

A Tabela 2 relaciona o tamanho de grão médio das partículas que entraram em contato com o ativador líquido, dessa forma, uma maior área de contato proveniente de um diâmetro menor ocasiona reações mais completas. Dependendo do tempo necessário de cura das pastas, é importante que as partículas do precursor estejam nas faixas granulométricas previstas, como informa a norma ABNT NBR 16697:2018 [9]. A exemplo da EGAF que ao final do ensaio obteve uma maior energia acumulada com tendência de crescimento, entende-se que sua composição química interferiu positivamente para esse ganho.

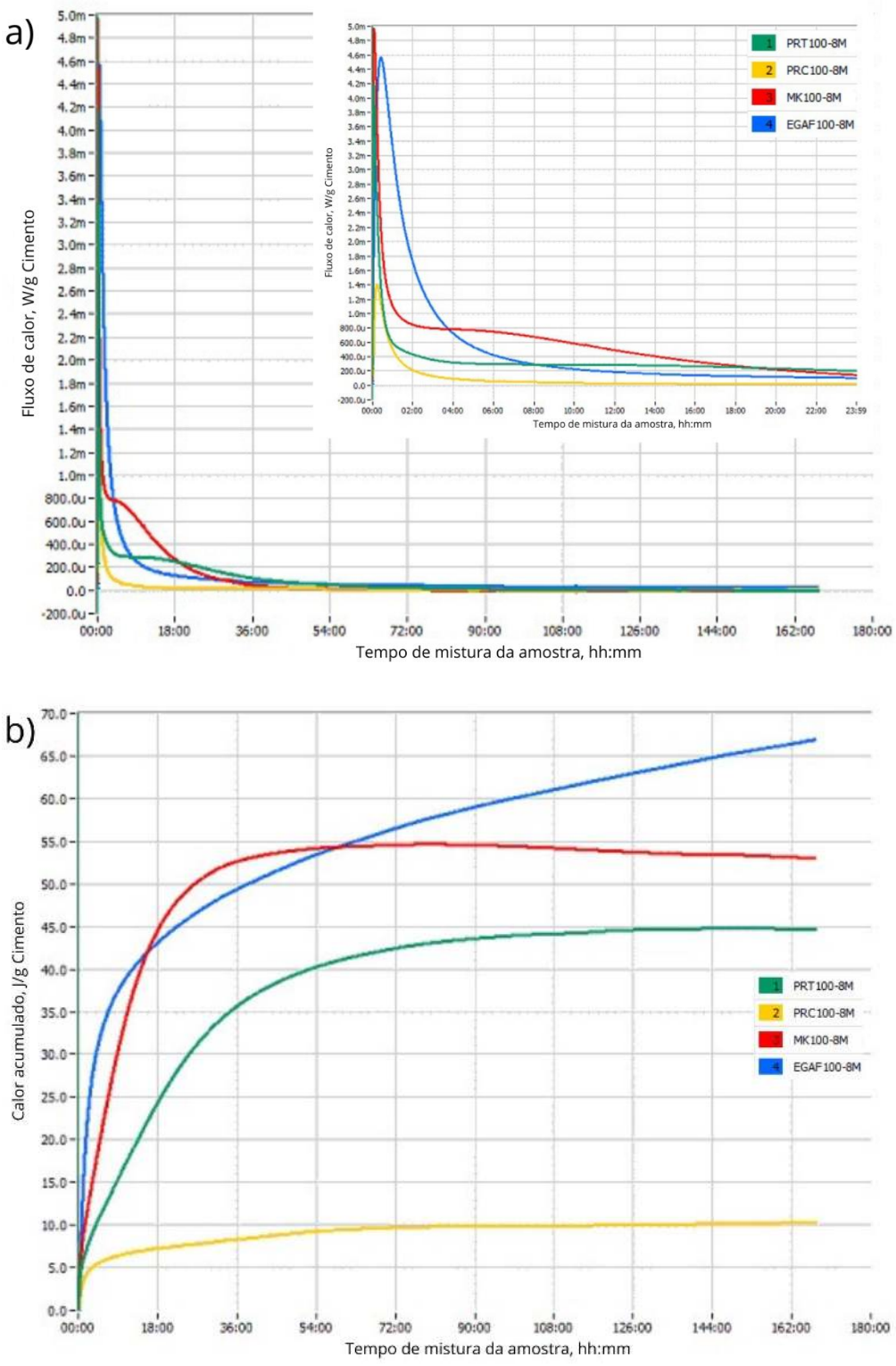
PRT - PRC

Como observado na Figura 1, o resultado de DRX apresenta picos muito semelhantes de estrutura cristalina para as variações de precursor nas misturas. Isso configura pastas com pouca presença de espécies altamente reativas entre si.

Na Figura 3 podem-se observar as curvas de fluxo de calor para a combinação de PRT e PRC, ambos resíduos gerados no setor de construção e demolição. A Figura 3a aponta o pico inicial de reação dos precursores com o NaOH, sem outro grande pico de reações durante o tempo de ensaio.

Conforme a Figura 3a, os dados de PRC mostram um baixo fluxo de calor quando comparado ao PRT. Na mistura entre eles isso é evidenciado já que menores proporções de PRT na amostra ocasionam em menor fluxo de calor também, isso porque as reações são minimizadas quando realizadas entre baixos teores de aluminossilicatos e NaOH.

Figura 2: Evolução de calor dos precursores PRT, PRC, MK e EGAF ativados usando NaOH 8M

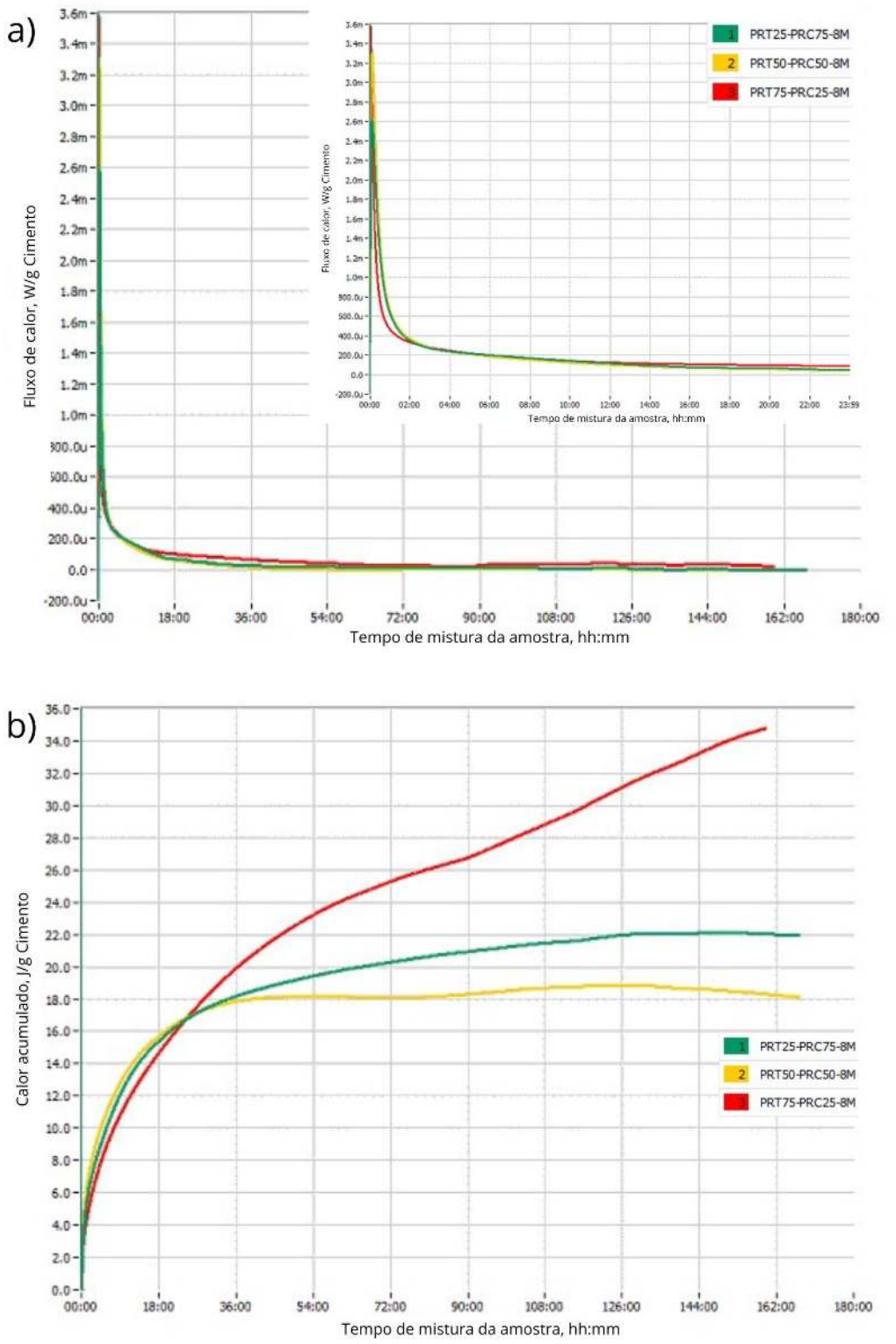


Fonte: o autor

A Figura 3b, para a amostra com mais PRT, ilustra menor energia nas primeiras horas, mas com *cross over* em 24 horas, aproximadamente, e um crescimento acentuado de calor ao longo do tempo. Um pequeno pico que começa aparecer em cerca de 90 horas de ensaio e que se mantém crescente até o final. Isso porque as ligações estão sendo realizadas mesmo após as primeiras dissoluções do OH-. Para as misturas PRT50 PRC50

e PRT25 PRC75 com concentrações mais altas de CaO, nos primeiros instantes houve um súbito aumento de calor no sistema, mas que teve sua manutenção até o fim do ensaio com comportamentos similares, apenas com a composição intermediária acumulando um pouco menos de energia.

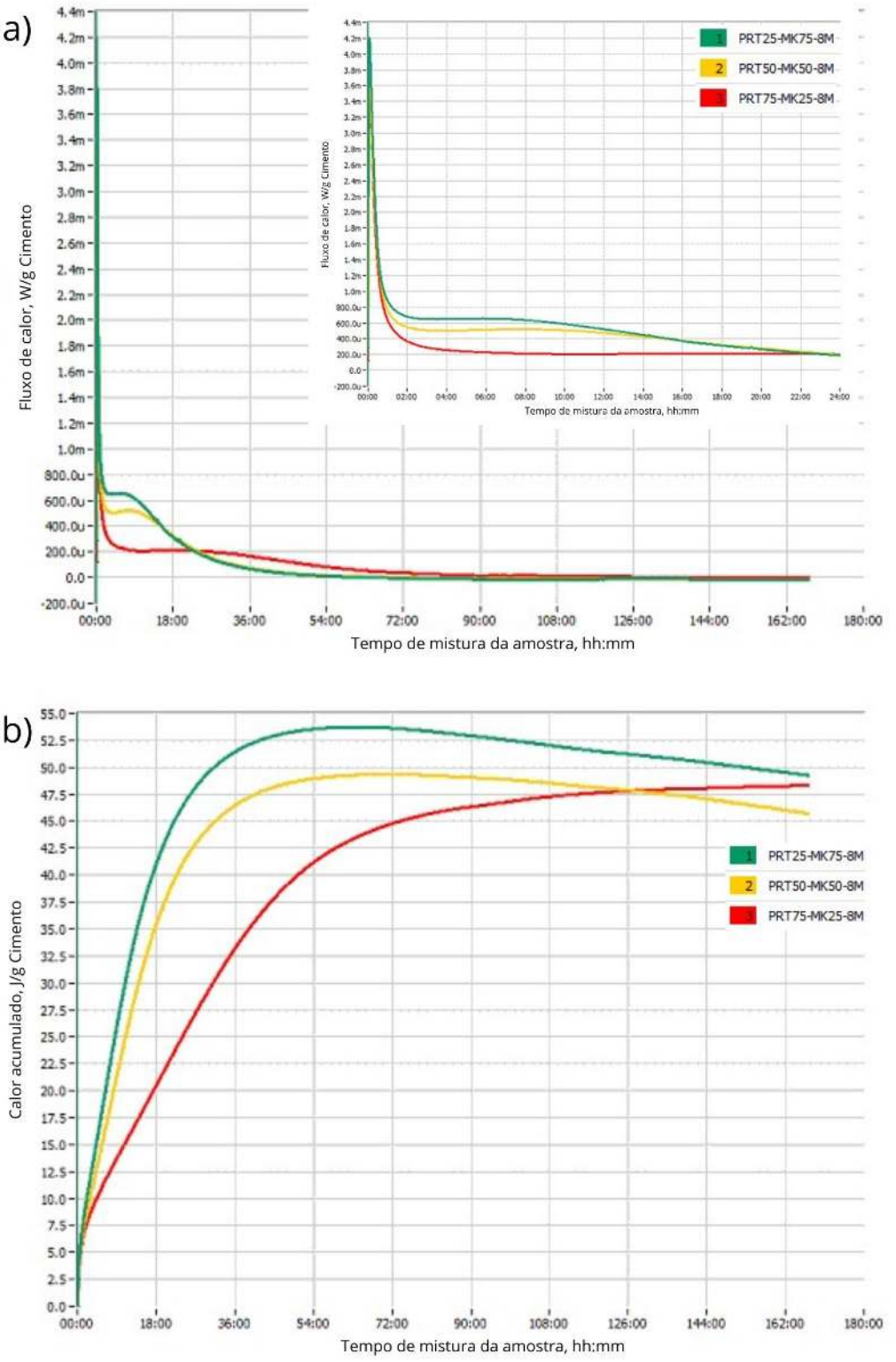
Figura 3: Evolução de calor do PRT e PRC ativados em diferentes proporções usando NaOH 8M



Fonte: o autor

PRT – MK

Figura 4: Evolução de calor do PRT e MK ativados em diferentes proporções usando NaOH 8M



Fonte: o autor

A pasta PRT75 MK25 não apresenta a formação de géis amorfos de forma tão concisa como informa o resultado de DRX. Isso significa que há menos espécies reativas, e pode indicar a baixa energia liberada nas reações, em relação as outras pastas.

Conforme a Figura 4a, o padrão de crescimento dos picos é semelhante para todas as amostras, apenas para o sistema com mais PRT observa-se um período de constância do fluxo de calor mais prolongado, porém, sendo todas as reações exotérmicas. Para as demais amostras, esse fenômeno ocorre de forma mais curta até que a maioria das reações sejam realizadas, por volta de 36 horas.

Entretanto, a Figura 4b esclarece um padrão de consumo de energia para os sistemas com maior teor de MK. Isso pode ser explicado porque as misturas com composição majoritária de MK no sistema possuem menos CaO em sua composição e arranjos de Si-Al, como informa a Tabela 1, e isso ocasiona em uma menor evolução exotérmica uma vez que o CaO é responsável por agir como catalisador de reações que liberam calor ao sistema [6].

PRT - EGAF

Para a mistura entre PRT e EGAF observa-se um padrão na formação de dois picos durante as curvas, como mostra a Figura 5a. Tal padrão é influenciado com o aumento de PRT no sistema, que de modo simplório, quanto maior o teor de PRT mais longo o período de dormência entre o primeiro e segundo pico. Na amostra PRT25 EGAF75, as principais reações de geopolimerização ocorrem nos primeiros instantes de ensaio, até cerca de 30 minutos. Para a amostra PRT50 EGAF50, reações mais intensas voltam a acontecer entre 1 e 4 horas. Já para o caso 3, o período de dormência é mais longo e reações exotérmicas só ocorrem várias horas depois. Dessa forma, infere-se que o aumento de PRT no sistema retarda a evolução das reações.

Com a Figura 5b, nota-se nitidamente um comportamento mais lento para a maior dose de PRT, porém acentuado em longos períodos de tempo. Essa evolução final acontece também para a mistura intermediária, enquanto o sistema com mais EGAF possui caráter mais homogêneo após seu pico principal de liberação, com leve aumento ao longo do tempo. Esse aumento característico para todas as pastas, que terminaram o ensaio com crescimento contínuo das reações, pode ser justificado pela presença da EGAF nas misturas como visto na Figura 2b.

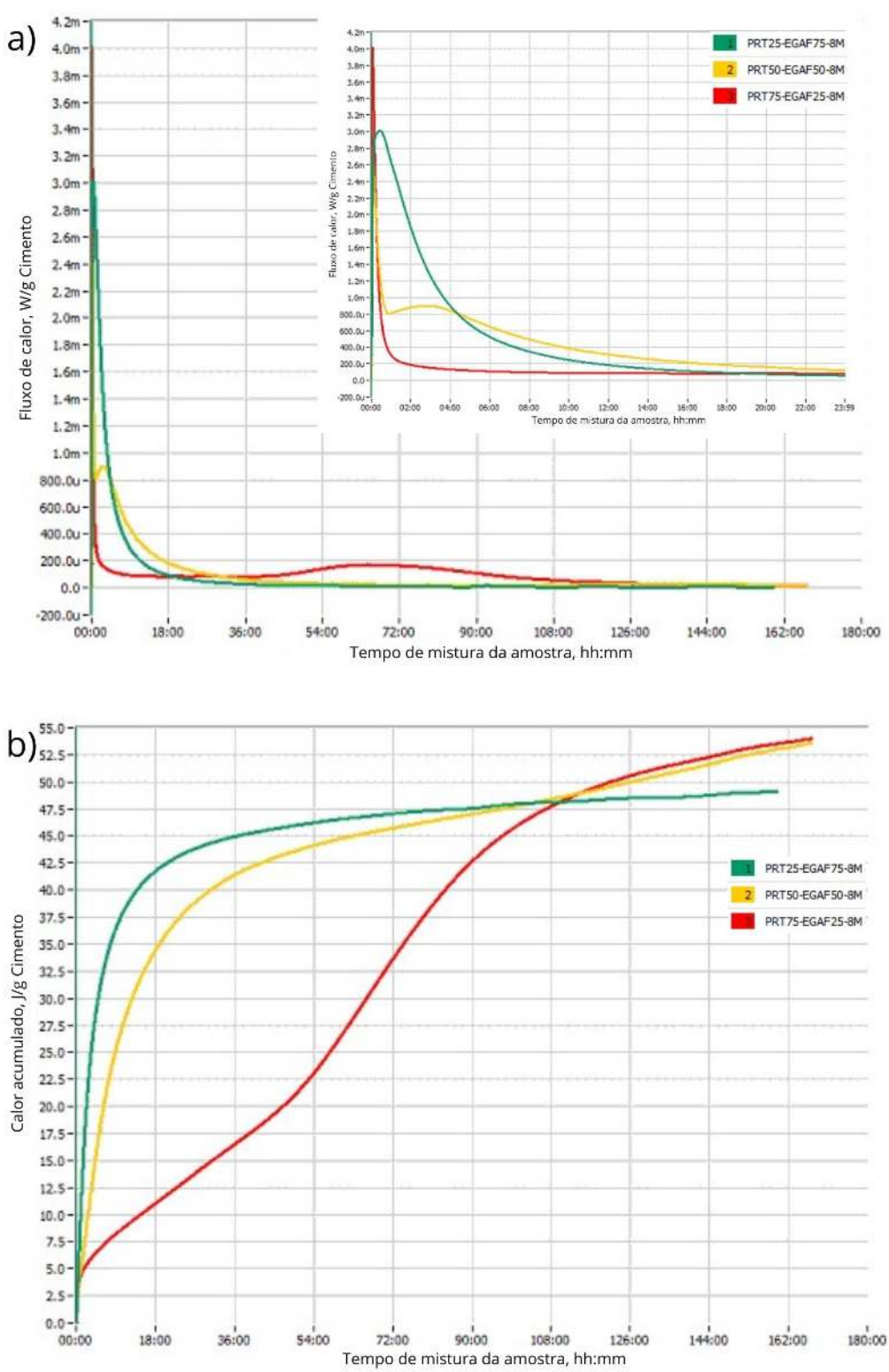
PRC – MK

Para as Figuras 6 a e b o comportamento das amostras com maior teor de MK foi bastante similar. O aumento significativo de Al_2O_3 e SiO_2 no sistema do MK sobre a composição do PRC é significativo para que a dissolução de OH- seja realizada nas ligações Al-O-Al e Si-O-Si, garantindo maior fluxo de calor ao longo do tempo [5].

Na figura 6a, para a pasta com maior composição de PRC na mistura, nota-se um pico inicial menos exotérmico que os demais, e isso ocorre como característica do PRC, como observado e discutido sobre a Figura 2a. Observa-se que antes do período de estabilidade o seu pico atinge aproximadamente 1,4mW/g. Com a adição de 25% de MK nesse caso, na Figura 6a, esse pico tem aumento para cerca de 1,8mW/g. Como

supracitado, o acréscimo de óxidos de silício e alumínio aumentam a reatividade do composto.

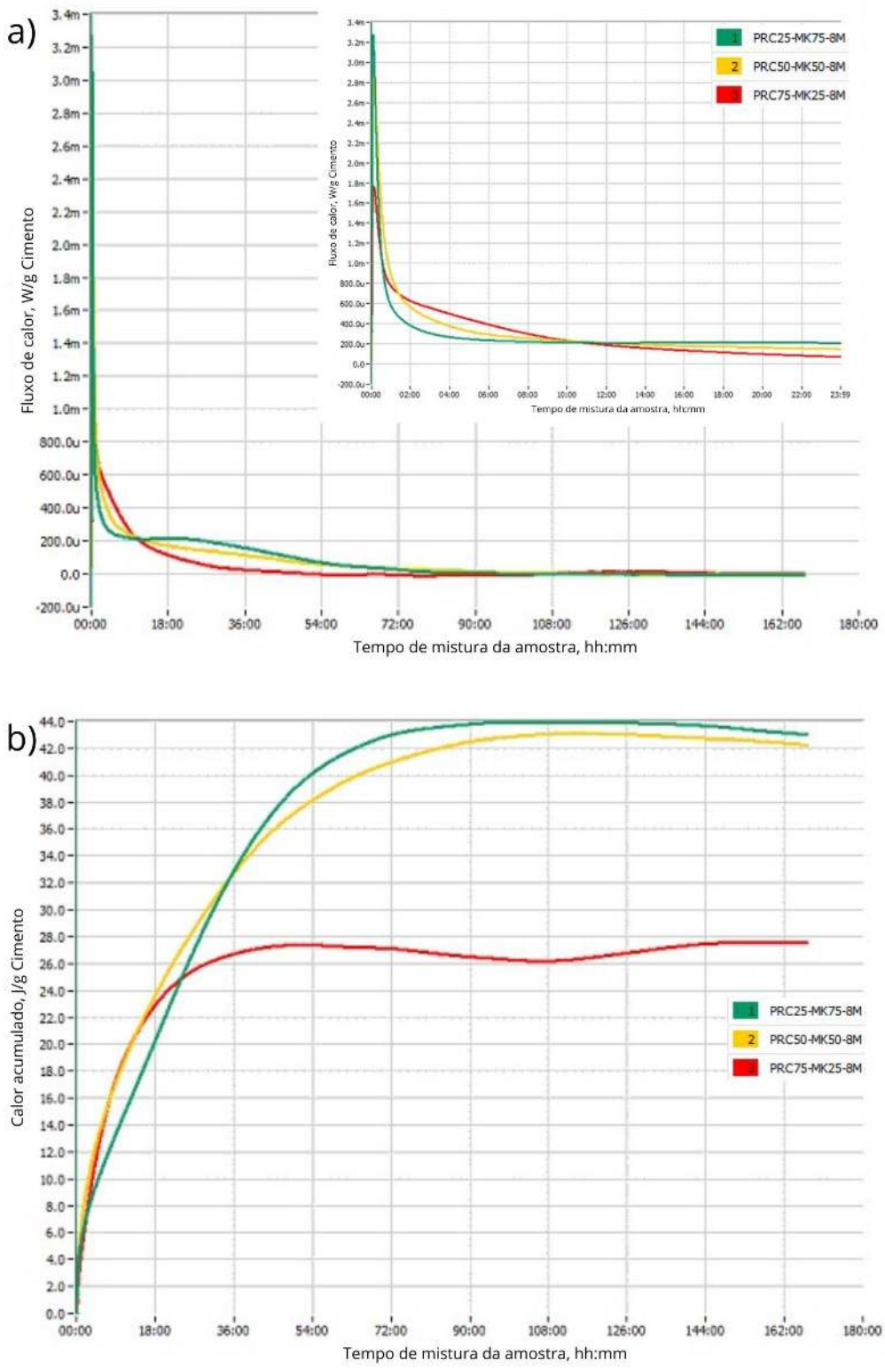
Figura 5: Evolução de calor do PRT e EGAF ativados em diferentes proporções usando NaOH 8M



Fonte: o autor

Como característica do MK, observam-se faixas endotérmicas para todas as pastas, até para aquelas com menor proporção deste material. De modo que esse efeito seja amenizado, o CaO do PRC reduz o consumo de energia do sistema.

Figura 6: Evolução de calor do PRC e MK ativados em diferentes proporções usando NaOH 8M



Fonte: o autor

CONCLUSÃO

Infere-se, portanto, que os objetivos de investigar as interações termodinâmicas e a formação de fases em sistemas geopoliméricos foram bem-sucedidos. As pastas foram bem incorporadas no sistema criado no calorímetro e possuíram sua mistura homogênea completa conforme os métodos seguidos. Essa etapa foi crucial para o bom rendimento dos resultados alcançados, e a partir disso, foi possível avaliar qualitativamente e quantitativamente tais resultados.

As pastas dos precursores tiveram resultados únicos, o que era esperado uma vez que suas composições químicas diferentes interferem diretamente nos mecanismos de reação.

Sendo assim, a EGAF possuiu melhor potencial energético durante todo o ensaio, o que reflete em melhores resultados de resistência mecânica e potencial durabilidade. Já o MK obteve bons resultados em períodos em que suas reações são majoritariamente exotérmicas.

O PRT agiu positivamente como um complemento para produção das pastas, principalmente para MK e EGAF. Embora o PRC agiu de forma sucinta individualmente, obteve resultados satisfatórios quando implementado em proporções menores juntamente ao MK e ao PRT.

De forma geral, o trabalho foi capaz de atingir as expectativas e pode ser usado de forma satisfatória quanto a manutenção na produção de pastas sustentáveis, duráveis e resistentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por seu apoio para participação no evento e com infraestrutura de equipamentos [Convênio: PCE-00405-24, APQ-01425-22 e RED-00191-23], e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo de produtividade em pesquisa [Convênio: PQ 316846/2023-6], bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

[1] AZEVEDO, A. G. de S.; STRECKER, K.; LOMBARDI, C. T.. Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha. **Cerâmica**, [S.L.], v. 64, n. 371, p. 388-396, set. 2018. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132018643712420.

[2] BREKAILO, F.; PEREIRA, Eduardo; PEREIRA, Elias; HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS, M. H. F. de. Avaliação do potencial reativo de adições de resíduos de blocos de cerâmica vermelha e de concreto cominuído de RCD em matriz cimentícia. **Cerâmica**, [S.L.], v. 65, n. 375, p. 351-358, set. 2019. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132019653752552.

[3] FRØLICH, Lasse; WADSÖ, Lars; SANDBERG, Paul. Using isothermal calorimetry to predict one day mortar strengths. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 88, p. 108-113, out. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.06.009.

[4] YAO, Xiao; ZHANG, Zuhua; ZHU, Huajun; CHEN, Yue. Geopolymerization process of alkali–metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. **Thermochimica Acta**, [S.L.], v. 493, n. 1-2, p. 49-54, set. 2009. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2009.04.002.

[5] SUN, Zengqing; VOLLPRACHT, Anya. Isothermal calorimetry and in-situ XRD study of the NaOH activated fly ash, metakaolin and slag. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 103, p. 110-122, jan. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.004.

[6] JU, Cheng; LIU, Yushi; JIA, Minjie; YU, Kunyang; YU, Zhenyun; YANG, Yingzi. Effect of calcium oxide on mechanical properties and microstructure of alkali-activated slag composites at sub-zero temperature. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 32, p. 101561, nov. 2020. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101561.

[7] ASTM - American Society for Testing Materials. **ASTM C 1679-17** - Standard Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry. In: Annual Book of ASTM, 2017.

[8] SHAO, Jiahu; GAO, Jianming; ZHAO, Yasong; CHEN, Xuemei. Study on the pozzolanic reaction of clay brick powder in blended cement pastes. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 213, p. 209-215, jul. 2019. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.307.

[9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

[10] LINDEROTH, O.; WADSÖ, L.; JANSEN, D.. Long-term cement hydration studies with isothermal calorimetry. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 141, p. 106344, mar. 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106344.

[11] SOUZA, L.N.; FIGUEIREDO, P.F.; FRANÇA, S.; SILVA, M.V.S.; BORGES, P.H.R.; BEZERRA, A.C.d.S. **Effect of Non-Calcined Sugarcane Bagasse Ash as an Alternative Precursor on the Properties of Alkali-Activated Pastes.** Molecules, v. 27, p.1185, 2022.