

Cimento álcali-ativado: influência da substituição parcial de lodo de Estação de Tratamento de Água por metacaulim

Alkali-activated cement: the influence of partial replacement of sewage sludge from Wastewater Treatment Plant for metakaolin

DOI:10.34117/bjdv9n1-237

Recebimento dos originais: 12/12/2022

Aceitação para publicação: 13/01/2023

Aedjota Matos de Jesus

Doutorando em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Federal do Pará (UFPA)

Endereço: R. Augusto Corrêa, 01, Guamá, Belém - PA, CEP: 66075-110

E-mail: aedjota@gmail.com

Hugo Rodrigues da Silva

Graduando do Curso de Técnico em Química

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO)

Endereço: Av. Calama, 4985, Flodoaldo Pontes Pinto, Porto Velho - RO,

CEP: 76820-441

E-mail: ughsilva00@gmail.com

Fabício Aurélio Fernandes Braga

Graduando do Curso de Técnico em Química

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO)

Endereço: Av. Calama, 4985, Flodoaldo Pontes Pinto, Porto Velho - RO,

CEP: 76820-441

E-mail: aureledebraga@gmail.com

Nayessa Evelyn Braga Teixeira

Graduanda do Curso de Técnico em Química

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO)

Endereço: Av. Calama, 4985, Flodoaldo Pontes Pinto, Porto Velho - RO,

CEP: 76820-441

E-mail: nayessa10@gmail.com

Luciana Silvino Virgolino

Graduanda do Curso de Engenharia Civil

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO)

Endereço: Av. Calama, 4985, Flodoaldo Pontes Pinto, Porto Velho - RO,

CEP: 76820-441

E-mail: lucianasilvinovirgolino@gmail.com

Samanta Ferreira Azevedo

Graduanda do Curso de Engenharia Civil

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO)

Endereço: Av. Calama, 4985, Flodoaldo Pontes Pinto, Porto Velho - RO,

CEP: 76820-441

E-mail: samanta.fa@hotmail.com

Daniela Giovanini Manuel Pires

Mestre em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO)

Endereço: Av. Calama, 4985, Flodoaldo Pontes Pinto, Porto Velho - RO,

CEP: 76820-441

E-mail: daniela.giovanini@ifro.edu.br

Marcelo de Souza Picanço

Doutor em Geologia e Geoquímica

Instituição: Universidade Federal do Pará (UFPA)

Endereço: R. Augusto Corrêa, 01, Guamá, Belém - PA, CEP: 66075-110

E-mail: marcelosp@ufpa.br

RESUMO

O lodo de Estação de Tratamento de Água tem se mostrado um insumo em potencial para produção de cimento álcali-ativado, devido principalmente sua composição química com elevados teores de sílica e alumina. Além disso, a utilização desse resíduo para desenvolvimento de cimento álcali-ativado representa uma solução ambientalmente adequada ao ser capaz de absorver o resíduo na cadeia produtiva do cimento álcali-ativado e emitir menor quantidade de CO₂ durante sua produção, quando comparada com a produção do cimento Portland. Neste sentido, o objetivo deste estudo é avaliar a influência da substituição parcial do lodo de Estação de Tratamento de Água por metacaulim nas propriedades de cimentos álcali-ativados. Para tanto, em função do tempo de pega e resistência à compressão, foram analisadas três dosagens de cimento álcali-ativado com substituição parcial em massa de lodo calcinado de Estação de Tratamento de Água da cidade de Porto Velho/RO por metacaulim nas proporções de 20%, 35% e 50%. Os resultados mostram que os cimentos álcali-ativados possuem tempos de início de pega rápido, pois são menores que 30 minutos, e duas dosagens (35% e 50%) apresentaram resistência superior a 25 MPa, o que torna o cimento álcali-ativado adequado para aplicação na construção civil. A análise estatística revelou que a substituição parcial em massa na proporção de 30% de lodo de Estação de Tratamento de Água por metacaulim afeta significativamente a propriedade de resistência à compressão.

Palavras-chave: geopolímero, resíduo industrial, cimento portland.

ABSTRACT

Wastewater Treatment Plant sludge has shown to be a potential input for the production of alkali-activated cement, mainly due to its chemical composition with high contents of silica and alumina. Moreover, sewage sludge use in developing alkali-activated cement represents an environmentally appropriate solution by including it in the production chain of alkali-activated cement and reducing CO₂ emissions compared with Portland cement. In this sense, the objective of this study is to evaluate the influence of the partial replacement of water treatment plant sludge by metakaolin on the properties of alkali-

activated cement. To this end, as a function of setting time and compressive strength, three dosages of alkali-activated cement were analyzed with partial replacement in the mass of calcined sludge from a Wastewater Treatment Plant in the city of Porto Velho (Brazil) by metakaolin in the proportions of 20%, 35%, and 50%. The results show that alkali-activated cement has fast setting times since they are less than 30 minutes and two dosages (35% and 50%) showed strength higher than 25 MPa, which makes the alkali-activated cement suitable for application in civil construction. Statistical analysis revealed that the partial replacement of 30% of Water Treatment Plant sludge by metakaolin significantly affects the compressive strength property.

Keywords: geopolymer, industrial waste, portland cement.

1 INTRODUÇÃO

Após a industrialização, o aquecimento global se tornou uma grande preocupação. Diante desse cenário, a indústria da construção civil vem se preocupando cada vez mais com meios de reduzir as emissões atmosféricas de gases que atuam diretamente no efeito estufa, como o CO₂, visto que a produção de cimento Portland é responsável por 8% da emissão de CO₂ no mundo. Uma solução para mitigar essas emissões é o uso de combustíveis alternativos e redução da relação clínquer/cimento (REIS *et al.*, 2021).

Outra alternativa para diminuir as emissões atmosféricas é realizar a substituição do cimento Portland por cimentos com menor impacto ambiental, como os cimentos álcali-ativados. Os cimentos álcali-ativados possuem menor potencial de aquecimento global, em termos de emissão de CO₂, quando comparado com as alternativas usuais baseadas em cimento Portland (OUELLET-PLAMONDON; HABERT, 2015).

Além disso, um aspecto relevante que contribui para menor impacto ambiental é a possibilidade de utilizar resíduos para produção de cimentos álcali-ativados. Existem uma infinidade de resíduos sólidos que podem ser utilizados para desenvolvimentos desses cimentos, como escórias não ferrosas, resíduos em forma de cinzas, resíduos de vidro, resíduos de mineração e cerâmica, resíduos de manufatura de rochas naturais (RAKHIMOVA, 2022).

Um resíduo que possui potencial para ser utilizado na produção de cimento álcali-ativado é o lodo gerado em Estação de Tratamento de Água (ETA), cujos produtos desenvolvidos a partir desse resíduo apresentaram propriedades similares aos produtos obtido por cimento Portland (JESUS; VIEIRA; VIEIRA, 2020; SUKSIRIPATTANAPONG *et al.*, 2015). O lodo de ETA possui composição mineral rica

em sílica, alumina e óxido de ferro, e geralmente é descartado no leito do rio, visto que não possui destino adequado (CUNHA *et al.*, 2019).

Neste sentido, o uso de lodo de Estação de Tratamento de Água para desenvolvimento de cimento álcali-ativado é viável técnica e ambientalmente. Primeiramente, por ser um material que possui composição adequada para desenvolvimento de cimento álcali-ativado. Em segundo lugar, a produção de cimento a partir desse resíduo emite menor quantidade de gases do efeito estufa, quando comparado com a produção de cimento Portland, representando uma solução apropriada para destinação deste resíduo. Portanto, o objetivo desta pesquisa é avaliar a influência da substituição parcial do lodo de Estação de Tratamento de Água por metacaulim nas propriedades de cimentos álcali-ativados. Para isso, foram analisados a composição química dos precursores, o tempo de pega e a resistência à compressão dos cimentos álcali-ativados desenvolvidos neste estudo.

2 METODOLOGIA

2.1 MATERIAIS

Para a produção do cimento álcali-ativado, utilizou-se metacaulim (MK), lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA), silicato de sódio, hidróxido de sódio e água. O silicato de sódio e o hidróxido de sódio foram adquiridos no comércio local da cidade de Porto Velho/RO.

O LETA utilizado foi coletado na Companhia de Águas e Esgotos (CAERD), localizada em Porto Velho/RO, em seguida o material foi seco com o auxílio de uma estufa a 105 °C, até a constância de massa. Após a secagem, o material foi moído utilizando almofariz e o pistilo e com auxílio de um pincel foi peneirado em uma peneira de abertura 150 µm, tal que se aproveitou apenas o material passante. Posteriormente, o material foi calcinado em forno mufla durante a temperatura de 750 °C por um patamar de três horas.

Os precursores sólidos foram caracterizados pela técnica de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) a fim de determinar a composição química em quantidades de óxidos. O FRX foi realizado por meio de energia dispersiva em um espectrômetro da marca PANalytical e modelo EPSILON 3^x, pertencente ao Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos – LAMAC, da Universidade Federal do Amazonas.

2.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL, DOSAGEM E PREPARAÇÃO DO CIMENTO ÁLCALI-ATIVADO

Foram produzidas três diferentes dosagens de cimento álcali-ativado, tendo como variável a substituição parcial em massa de LETA por MK, nas proporções de 20%, 35% e 50%, que foram denominados de CA20, CA35 e CA50, respectivamente, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Formulações das dosagens com as quantidades de materiais utilizados para preparo dos cimentos álcali-ativados a base de lodo de Estação de Tratamento de Água e metacaulim.

Dosagem dos cimentos álcali-ativado	LETA (g)	MK (g)	NaOH (g)	Silicato de sódio (g)	H ₂ O (mL)
CA20	80	20	9,28	92,06	27,1
CA35	65	35	9,28	92,06	27,1
CA50	50	50	9,28	92,06	27,1

Fonte: Autores, 2022.

As razões molares SiO₂/Al₃O₂ foram respectivamente 2,93, 3,10 e 3,71. Os demais parâmetros de dosagem do cimento álcali-ativado permaneceram fixos, como a concentração do ativador alcalino em 8,56 mol.L⁻¹. Como variável resposta adotaram-se as propriedades de tempo de pega e resistência à compressão.

2.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Para a caracterização dos cimentos álcali-ativados foram realizados ensaios no estado fresco e no estado endurecido. Durante o estado fresco obteve-se o tempo de pega, enquanto no estado endurecido determinou-se a resistência à compressão das amostras.

A determinação do tempo de pega foi realizada conforme as determinações da NBR 16607 (ABNT, 2017), em que se determina o tempo de pega através de um aparelho de Vicat. As três dosagens foram postas no molde e submetidas ao teste com intervalo de 1 minuto nos primeiros 30 minutos e depois disso, em intervalos de 5 minutos, até determinar o início e o fim do tempo de pega.

A determinação de resistência à compressão foi realizada conforme determina a NBR 7215 (ABNT, 2019), no qual se determinou a capacidade resistiva dos corpos de provas cilíndricos aos 28 dias de cura nas condições de laboratório. Para o ensaio, utilizou-se moldes de dimensões 25 mm de diâmetro por 50 mm de altura, utilizando uma prensa hidráulica com indicador digital e capacidade de 20 toneladas para o rompimento.

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

A análise estatística dos dados de resistência à compressão e tabulação dos dados foram realizadas no *software* livre Jamovi. Para isso, os dados da resistência à compressão das dosagens foram submetidos ao teste ANOVA de Welch (variância heterogênea) para verificar se há ou não diferença significativa entre as médias dos valores da resistência à compressão. Os dados também foram submetidos ao teste Post-Hoc de Games-Howell (variância heterogênea) para avaliar se duas médias têm ou não diferença estatística significativa. Para tanto, utilizou-se como parâmetro um intervalo de confiança de 95% e nível de significância de $\alpha = 0,05$, tal que se o p-valor calculado for menor que o valor de α , deve-se rejeitar a hipótese nula.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PRECURSORES

Na Tabela 2 estão as composições químicas expressas em quantidade percentual de óxidos do LETA calcinado e metacaulim, cujos dados mostram que a composição dos materiais é majoritariamente composta por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3).

Tabela 2 - Composições químicas do LETA calcinado e do metacaulim.

Óxidos	LETA calcinado	Metacaulim
SiO_2	42,93	55,66
Al_2O_3	19,94	37,28
Fe_2O_3	26,66	1,28
K_2O	6,72	4,71
P_2O_5	0,74	0,78
CaO	0,80	-
Outros	2,21	0,29

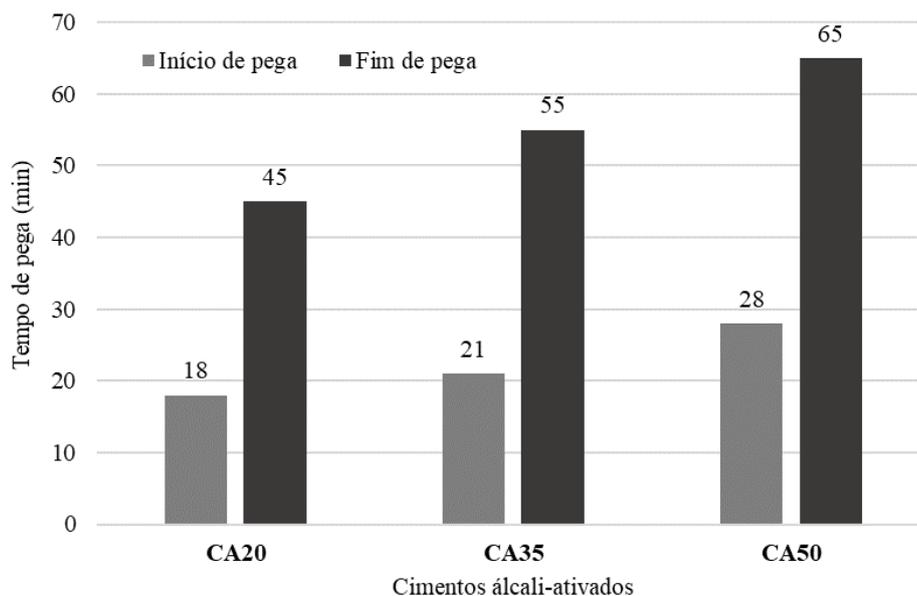
Fonte: Autores, 2022.

Os dados da composição química dos materiais estão de acordo com encontrado na literatura, como os estudos de Abdelaal *et al.* (2020) e Manaenkov, Steinerova, Kuklev (2021), que utilizaram, respectivamente, LETA e metacaulim para desenvolvimento de geopolímeros. Neste sentido, tanto o LETA quanto o metacaulim possuem composição química compatível para desenvolvimento de cimento álcali-ativado.

3.2 TEMPO DE PEGA

A Figura 1 mostra os resultados do tempo de início e fim de pega dos cimentos álcali-ativados obtidos a partir de LETA e metacaulim, que apresentam solidificação relativamente rápida com tempos de início de pega menor que 30 minutos, o que é característico de cimentos de pega rápida.

Figura 1 – Tempos de pega dos cimentos álcali-ativados desenvolvidos a partir da substituição parcial de LETA calcinado por metacaulim



Fonte: Autores, 2022.

Observa-se que o aumento da substituição parcial de LETA por metacaulim de 20% (CA20) para 35% (CA35) e 50% (CA50) promoveu o aumento do tempo de pega. Isso decorre devido redução da quantidade alumina, pois a relação molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ aumentou de 2,93 para 3,71, o que proporciona um retardamento no tempo de endurecimento, conforme já constatado por Jesus, Vieira e Vieira (2020). A sílica e a alumina são responsáveis por controlar nucleação de geopolímeros e no crescimento do gel, tal que a redução da razão molar entre sílica e alumina reflete em um maior grau de contribuição da alumina na rede de geopolímeros (HAJIMOHAMMAD; PROVIS; VAN DEVENTER, 2011). Em consequentemente disso, ocorre uma nucleação mais rápida dos cimentos álcali-ativados, bem como um enrijecimento acelerado.

3.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na Tabela 3 estão dispostos os valores característicos da resistência à compressão dos cimentos álcali-ativados desenvolvidos neste, cujo cimento CA50 apresentou maior média de resistência à compressão (28,52 MPa), o que torna o material adequado para fins estruturais, segundos os critérios estabelecidos na norma NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 3 - Resistência à compressão dos corpos de prova dos cimentos álcali-ativados desenvolvidos neste estudo

Corpos de prova	Resistência à compressão dos cimentos álcali-ativados (MPa)		
	CA20	CA35	CA50
CP1	14,08	18,44	28,12
CP2	15,45	32,99	32,26
CP3	18,44	26,85	25,19
Média	15,99	26,09	28,52
Variância	4,97	53,36	12,62

Fonte: Autores, 2022.

Constata-se que a substituição parcial de LETA por metacaulim favorece o aumento da resistência à compressão, uma vez que à medida que se aumentou a substituição parcial ocorreu um aumento na resistência à compressão. Essa diferença entre as resistências à compressão dos cimentos álcali-ativados é estatisticamente significativa, visto que a ANOVA apresentou o p-valor (0,027) menor que 0,05 (5%).

Na Tabela 4 tem-se o resultado do teste de Post-Hoc, que indica que apenas as resistências médias à compressão dos cimentos álcali-ativados CA20 e CA50 são significativamente diferentes, pois p-valor (0,022) é menor que 0,05 (5%).

Tabela 4 – Resultado com p-valores do teste Post-Hoc de Games-Wowel.

	CA20	CA35	CA50
CA20	-	0,232	0,022
CA35	0,232	-	0,869
CA50	0,022	0,869	-

Fonte: Autores, 2022.

Ao realizar a comparação os cimentos álcali-ativados CA20 com CA35 ou CA35 com CA50 constata-se que acréscimo da substituição parcial de LETA por metacaulim

em 15% não afeta significativamente a resistência à compressão dos cimentos álcali-ativados desenvolvidos neste estudo. Ou seja, apenas suplementação de 30% na substituição parcial de LETA por metacaulim é capaz de alterar estatisticamente a resistência à compressão dos cimentos álcali-ativados.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo avaliou a influência da substituição parcial do lodo de Estação de Tratamento de Água por metacaulim nas propriedades de cimentos álcali-ativados. Para tanto, realizou-se a substituição parcial do lodo calcinado oriundo da Estação de Tratamento de Água de Porto Velho/RO por metacaulim nas proporções em massa de 20, 35 e 50%. A caracterização dos precursores sólidos mostra que os materiais utilizados possuem características adequadas para desenvolvimentos de matriz cimentícia álcali-ativada, visto que possuem composição química com elevados teores de sílica e alumina.

A partir do ensaio de determinação dos tempos de pega, constatou-se que os cimentos álcali-ativados a base de LETA possuem tempo de início de pega rápido (menor que 30 minutos). Além disso, quanto maior a substituição parcial de LETA por metacaulim, maiores são os tempos de pega dos cimentos álcali-ativados desenvolvidos neste estudo.

Quanto a resistência à compressão dos cimentos álcali-ativados, observou-se que as dosagens CA35 e CA50 apresentaram resistência superior a 25 MPa, o que ao critério normativo da NBR 16697. Ademais, o aumento da substituição parcial promoveu um aumento na resistência à compressão dos corpos de provas.

Todavia, estatisticamente, as substituições parciais em massa de LETA por metacaulim na proporção de 15% não influenciam consideravelmente na resistência à compressão dos cimentos álcali-ativados nas dosagens estudadas. Tal que por meio de análise estatística, verificou que apenas substituição parcial de 30% afeta significativamente a propriedade de resistência à compressão.

Sugere-se que em estudos futuros seja avaliado a influência da variação da molaridade da solução ativadora, bem como verificado o comportamento do cimento álcali-ativado aplicado nos desenvolvimentos de argamassas e concretos aplicados à construção civil.

REFERÊNCIAS

ABDELAAL, Ahmed *et al.* Immobilization of some heavy metals in geopolymer based on water treatment sludge and alum industry solid waste. **Alfarama Journal of Basic & Applied Sciences**, v. 1, n. 2, p. 137-147, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

CUNHA, Geremias Dourado *et al.* Caracterização e destinação ambientalmente corretas do lodo gerado pelas estações de tratamento de água. **Nature and Conservation**, v. 12, n. 2, p. 19-30, 2019.

HAJIMOHAMMADI, Ailar; PROVIS, John L.; VAN DEVENTER, Jannie SJ. The effect of silica availability on the mechanism of geopolymerisation. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 3, p. 210-216, 2011.

JESUS, Aedjota M.; VIEIRA, Raimundo K.; VIEIRA, Adalena K. Use of sludge from water treatment station to produce Geopolymer cement. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 6, p. 3367-3378, 2020.

MANAENKOV, Alexey; STEINEROVA, Michaela; KUKLEVA, Ekaterina. Effect of kaolin addition into metakaolin geopolymer composite. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 1, p. 06020022, 2021.

OUELLET-PLAMONDON, C.; HABERT, G. Life cycle assessment (LCA) of alkali-activated cements and concretes. In: **Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes**. Woodhead Publishing, 2015. p. 663-686.

RAKHIMOVA, Nailia R. Recent advances in blended alkali-activated cements: A review. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 26, n. 10, p. 4596-4618, 2022.

REIS, Daniel Costa *et al.* Potential CO₂ reduction and uptake due to industrialization and efficient cement use in Brazil by 2050. **Journal of Industrial Ecology**, v. 25, n. 2, p. 344-358, 2021.

SUKSIRIPATTANAPONG, Cherdasak *et al.* Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 20-30, 2015.