

ESTUDO DE DIFERENTES MÉTODOS PARA PRODUÇÃO DE CIMENTO ALCALINO A PARTIR DE RESÍDUOS

EDUARDA RAZADOR LAZZARI^{1,2}, RAFAELA POLLON^{2,3}, EDUARDO PAVAN
KORF^{2,4}

1 Introdução

As atividades industriais de produção de cimento Portland impactam o aquecimento global com emissões de gases de efeito estufa devido às emissões na atmosfera, além de ser o 7º maior consumidor de energia dentre os setores industriais no Brasil (Brasil, 2017). Como alternativa ao cimento Portland surgiram os cimentos ativados por álcalis (CAA), que consistem em um material precursor silico-aluminoso que, quando misturado com um ativador alcalino, adquire propriedades similares ao cimento Portland (Payã et al, 2022).

Os cimentos ativados por álcalis podem ser classificados através do seu método de sintetização: se a água é adicionada como solução de álcalis (sistema *two-part*) ou diretamente sobre a mistura de todos os sólidos, precursores mais ativadores (sistema *one-part*) (Cristelo et al., 2021).

Nessa lógica, esta pesquisa buscou avaliar a viabilidade de um cimento álcali-ativado (CAA) pelos dois métodos de sintetização, tendo a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) como o precursor, a cal de carbureto (CC) como a fonte de cálcio e o hidróxido de sódio (NaOH) como ativador alcalino. O ligante proveniente desses resíduos apresenta-se como uma alternativa ao cimento Portland, devido às menores taxas de emissões de CO₂, menor gasto energia e como estratégia de valorização, devido à redução de gastos no tratamento e disposição destes resíduos, bem com descartes incorretos (Pollon et al., 2024).

¹Acadêmica do curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS, *campus Erechim RS*, **bolsista**, contato: eduardalazzari@outlook.com

²Grupo de Pesquisa em Resíduos e Geotecnia Ambiental.

³Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental, UFFS, Brasil.

⁴Doutor em Engenharia Civil/Geotecnia, docente do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, UFFS, *campus Erechim RS*, **orientador**, contato: eduardo.korf@uffs.edu.br

2 Objetivo

Avaliar o desempenho físico-mecânico do ligante álcali-ativado produzido a partir da cal de carbureto (CC) e da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), conjuntamente com a análise da influência das variáveis de interesse e comparação dos diferentes métodos de desenvolvimento do ligante.

3 Metodologia

Para o preparo do ligante álcali-ativado utilizou-se a CBCA como precursor, a CC como fonte de cálcio e o hidróxido de sódio (NaOH) como ativador alcalino. A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) foi fornecida por uma empresa situada no município de Porto Xavier, noroeste do Rio Grande do Sul, Brasil e foi originada do processamento de subprodutos de cana-de-açúcar. A CBCA, foi submetida à secagem em 105°C por 24h e peneiramento na malha 200, abertura 75µm. A cal de carbureto (CC) utilizada foi advinda de uma indústria de gás acetileno do Rio Grande do Sul, Brasil. Foi seca em 60 °C por 72 h e peneirada na malha 200, abertura de 75µm. O hidróxido de sódio utilizado foi em micropérolas, com pureza de 97%, do fabricante NEON.

A definição das variáveis dos materiais utilizados foi baseada em uma revisão da literatura, onde notou-se um maior interesse por estudos com temperatura ambiente e com baixas concentrações molares (Pollon et al., 2024). O planejamento experimental realizado é do tipo fatorial completo em duplicata e conta com 96 combinações para cada método de sintetização. A relação água/sólidos foi fixada em 1,40, temperatura de cura ambiente (23°C) e as variáveis controladas foram: tempo de cura (3, 7 e 28 dias), relação cinza/cal (90/10 [9], 80/20 [4], 70/30 [2,33], 60/40 [1,5]), molaridade (1,0; 1,5; 2,0; 2,5 M) e método de mistura (*one-part* e *two-part*).

A moldagem dos corpos de prova pelos dois métodos de mistura foi feita em moldes de PVC, com 3,7 cm de diâmetro e 7,4 cm de altura. Para o método *one-part* homogeneizou-se inicialmente a CBCA, a CC e o hidróxido de sódio em micropérolas, e a água destilada foi adicionada ao final, homogeneizando-se novamente. Para o método *two-part* homogeneizou-se a CBCA e a CC e adicionou-se a solução de NaOH ao final, já em temperatura ambiente. A mistura não foi compactada, sendo preenchido em camada única e vibrada por meio de golpes consecutivos sobre uma superfície plana.

Os corpos de prova foram mantidos em temperatura ambiente de 23°C durante todo o

período de cura estipulado e após isso, todos foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples (RCS), seguindo a metodologia C39/C39M (ASTM, 2023).

4 Resultados e Discussão

Por meio da análise do Quadro 1 e 2, que apresentam resultados de 3 e 7 dias de cura, respectivamente, percebe-se que as maiores RCS em ambos os tempos foram atingidas com a relação cinza/cal de 80/20 e molaridade 1,5M. Já aos 28 dias, como mostra o Quadro 3, as maiores resistências foram resultado da combinação da relação cinza/cal de 70/30 e molaridade 2,0M. Observa-se, então, que as maiores resistências sempre estão atreladas aos valores intermediários das combinações.

Quadro 1: Resultado da RCS dos corpos de prova com 3 dias de tempo de cura (valor médio da duplicata em kPa)

	3 DIAS	90/10	80/20	70/30	60/40
<i>ONE-PART</i>	1,0M	373	440	439	348
	1,5M	315	598	477	390
	2,0M	289	274	474	275
	2,5M	340	296	522	343
<i>TWO-PART</i>	1,0M	366	455	342	366
	1,5M	352	555	405	342
	2,0M	302	452	402	264
	2,5M	202	275	421	319

Fonte: Autor (2025)

Quadro 2: Resultado da RCS dos corpos de prova com 7 dias de tempo de cura (valor médio da duplicata em kPa)

	7 DIAS	90/10	80/20	70/30	60/40
<i>ONE-PART</i>	1,0M	458	630	488	365
	1,5M	444	660	453	392
	2,0M	306	469	520	512
	2,5M	332	300	470	429
<i>TWO-PART</i>	1,0M	705	701	509	485
	1,5M	432	833	541	426
	2,0M	419	617	531	374
	2,5M	303	503	468	372

Fonte: Autor (2025)

Quadro 3: Resultado da RCS dos corpos de prova com 28 dias de tempo de cura (valor médio da duplicata em kPa)

	28 DIAS	90/10	80/20	70/30	60/40
ONE-PART	1,0M	538	787	849	721
	1,5M	531	1227	1184	777
	2,0M	310	918	1393	1057
	2,5M	430	681	1179	1217
TWO-PART	1,0M	594	763	717	887
	1,5M	613	1287	1109	899
	2,0M	514	1109	1594	1304
	2,5M	425	1119	974	1277

Fonte: Autor (2025)

Utilizando o Teste de Tukey com 95% de confiança, mesmo com os valores de RCS do método *two-part* estando levemente acima, observou-se que eles são estatisticamente iguais considerando as variáveis analisadas.

Observa-se que com o aumento do tempo de cura, há um aumento significativo da RCS, pois as reações continuam ocorrendo com o passar do tempo. Com a relação à proporção de cinza/cal, as combinações intermediárias são as mais significativas ao observar a RCS, isso porque uma quantidade intermediária de cálcio é necessária para que reaja com silicatos da cinza, formando silicato de cálcio hidratado (Ferreira et al., 2023). Já com relação à variação da molaridade, tem-se um aumento da RCS de 1M para 1,5M e depois diminuição de 2M e 2,5M, pois uma quantidade mínima de NaOH é necessária para a dissolução da sílica e do alumínio. Dessa forma, o tempo de cura, a relação cinza/cal e a molaridade do ativador se mostraram as variáveis, que, nessa ordem, influenciaram no comportamento mecânico do ligante álcali-ativado.

5 Conclusão

Os maiores resultados de resistência à compressão simples foram atingidos com molaridade do hidróxido de sódio de 2,0M, com 28 dias de cura, com relação cinza/cal 2,33 e método de mistura *two-part*, atingindo 1,60 MPa.

O tempo de cura, a relação cinza/cal e a molaridade do ativador se mostraram as variáveis, que, nessa ordem, influenciaram no comportamento mecânico do ligante álcali-ativado. Quanto aos métodos de mistura, a análise estatística indicou que, considerando as

variáveis avaliadas, as diferenças observadas entre os valores não são estatisticamente significativas.

O cimento álcali-ativado desenvolvido nesta pesquisa pode ser aplicado para usos condizentes com sua RCS atingida, como na geração de concreto ou argamassa para estabilização de rejeito de mineração, estabilização de solos, bases de fundações superficiais em obras de pequeno porte e produção de peças de mobiliário urbano.

Referências Bibliográficas

ASTM INTERNATIONAL. ASTM C39/C39M – Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **MODELAGEM SETORIAL DE OPÇÕES DE BAIXO CARBONO PARA O SETOR DE CIMENTO.** Brasília, 2017.

CRISTELO, Nuno et al. One-part hybrid cements from fly ash and electric arc furnace slag activated by sodium sulphate or sodium chloride. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 103298, 2021.

FERRAZZO, Suéllen Tonatto et al. Mechanical and environmental behavior of waste foundry sand stabilized with alkali-activated sugar cane bagasse ash-eggshell lime binder. **Construction and Building Materials**, v. 383, p. 131313, 2023.

FERREIRA, Flávio Antônio et al. Evaluation of mechanical and microstructural properties of eggshell lime/rice husk ash alkali-activated cement. **Construction and Building Materials**, v. 364, p. 129931, 2023.

PAYÃ, Jordi et al. Ativadores alternativos para cimentos ativados por alcalinos. **Revista ALCONPAT**, v. 12, n. 1, p. 16-31, 2022.

POLLON, Rafaela et al. Alkali-Activated Materials Using Sugarcane Bagasse Ash: A Bibliometric Review. In: Korf, Eduardo Pavan et al. **Environmental Geotechnics: Waste and Geotechnical Stabilization**. New York: Nova Science Publishers, 2024.

Palavras-chave: Cal de carbureto, Cinza de bagaço da cana-de-açúcar, Resistência.

Nº de Registro no sistema Prisma: PES 2024- 0513

Financiamento: