SBCC 2025
II Simpósio Brasileiro de Ciência do Cimento

INSIGHTS PARA OTIMIZAÇÃO DA SOLUÇÃO LIXIVIADORA DE CIMENTO ANIDRO: EFEITOS DO PH NO PROLONGAMENTO DO PERÍODO DE INDUÇÃO

Insights for optimizing anhydro cement leaching solution: effects of pH on prolonging the induction period

Bruna Souza Rosa
Universidade Federal da Bahia | Salvador, Bahia | brunarosa@ufba.br

Samile Raiza Carvalho Matos
Universidade Federal do Sul da Bahia | Teixeira de Freitas, Bahia | samile.matos@ufsb.edu.br

Josinorma Silva de Oliveira,
Universidade Federal da Bahia | Salvador, Bahia | josinorma.esa@gmail.com

Ana Paula Kirchheim
Universidade Federal do Rio Grande do Sul | Porto Alegre, Rio Grande do Sul | anapaula.k@gmail.com

Jardel Pereira Gonçalves
Universidade Federal da Bahia | Salvador, Bahia | jardelpg@gmail.com

Resumo

A produção de cimento tem potencial para incorporar grandes volumes de resíduos, via coprocessamento ou uso como materiais cimentícios suplementares (MCS). Para isso, é necessário compreender os riscos ambientais associados à liberação de compostos potencialmente tóxicos (CPTs), oriundos dos resíduos, que podem estar presentes no cimento. Embora existam métodos para análise dos CPTs, em pasta de cimento hidratado via lixiviação, os riscos à saúde e ao ambiente podem ser mascarados pelo encapsulamento dos CPTs nos produtos de hidratação. Este estudo teve como objetivo otimizar soluções para ensaios de lixiviação no cimento CPV ARI RS anidro por meio da calorimetria isotérmica. Os resultados revelam que soluções contendo diferentes proporções de NaOH e HNO_3 apresentaram efeitos expressivos na cinética de hidratação. Uma das soluções de lixiviação avaliadas prolongou o período de indução e retardou o início da pega, possibilitando ensaios de lixiviação em torno de 20 horas antes da formação de fases hidratadas, o que evita o encapsulamento de CPT nas fases hidratadas e maior detecção quantitativa em comparação com método TCLP. Assim, este trabalho fornece insights para avanços nas metodologias de avaliação de risco ambiental do coprocessamento de resíduos em fornos de cimento e o uso de MCS residuais.

Palavras-chave: Lixiviação; Cimento anidro; Cinética de hidratação; Compostos potencialmente tóxicos (CPTs); Sustentabilidade.

Abstract

Cement production has the potential to incorporate large volumes of waste, via co-processing or use as supplementary cementitious materials (SCM). To do this, it is necessary to understand the environmental risks associated with the release of potentially toxic compounds (PTCs) from waste, which may be present in cement. Although there are methods for analyzing CPTs in cement paste hydrated via leaching, the risks to health and the environment can be masked by the encapsulation of CPTs in the hydration products. The aim of this study was to optimize solutions for leaching tests on anhydrous CPV ARI RS cement using isothermal calorimetry. The results show that solutions containing different proportions of NaOH and HNO3 had significant effects on hydration kinetics. One of the leaching solutions evaluated extended the induction period and delayed the onset of setting, enabling leaching tests to be carried out around 20 hours before the formation of hydrated phases, which avoids the encapsulation of CPT in the hydrated phases and greater detection of elements compared to the TCLP method. Thus, this work provides insights into advances in environmental risk assessment methodologies for the co-processing of waste in cement kilns and the use of residual MCS.

Keywords: Leaching; Anhydrous cement; Hydration kinetics; Potentially toxic compounds (PTCs); Sustainability

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland comum é um dos principais emissores de CO_2, liberando cerca de 0,44 toneladas de CO_2 por tonelada produzida (IEA, 2024; SNIC, 2024). Estratégias para mitigar essas emissões incluem o uso de resíduos como substitutos de combustíveis fósseis e a adoção de materiais cimentícios suplementares (MCS) (SCHNEIDER, 2023). O coprocessamento de resíduos na síntese de clínquer reduz o consumo de matérias-primas naturais e a geração de resíduos perigosos, mas pode aumentar os níveis de compostos potencialmente tóxicos (CPTs), tais

como óxidos de Ba, Cr, Cu, Zn, Pb, Ni, La, V, Co, Sb, Mo e Sn, no cimento (STAFFORD et al., 2015; YAN et al., 2010).

A liberação de CPTs para o ambiente representa riscos à saúde humana e ao meio ambiente, especialmente em interações do cimento com água, solo e ar (BELATO,2013). Embora estudos prévios tenham explorado a lixiviação do cimento, as pesquisas focaram na lixiviação de CPTs em cimento hidratado (BELATO,2013; ESPINOSA et al., 2000; L. WANG et al.,2010). Mas esse enfoque limita a detecção dos compostos, devido à formação de fases hidratadas que encapsula parte dos CPTs disponíveis e, não avalia completamente os riscos ambientais e de saúde relacionados ao cimento anidro (ESPINOSA et al., 2000; L. WANG et al., 2010; RACT et al., 2003). Por outro lado, a lixiviação realizada em estágios iniciais da hidratação fornece informações mais precisas sobre a liberação de compostos do cimento anidro, pois, esses compostos estariam mais disponíveis para lixiviação. Além disso, as normas atuais não consideram adequadamente os fatores químicos que influenciam a lixiviação em cimentos anidros, tais como, a influência do pH. Estudos indicam que a lixiviação de determinados elementos está diretamente relacionada ao pH do material (ENGELSEN et al., 2009; ENGELSEN et al., 2010). Alguns metais demonstram maior solubilidade em condições ácidas, o que pode ser atribuído à propensão intrínseca desses metais para formar óxidos de metal solúveis em ambientes ácidos (MALVIYA et al.,2006; LI et al.,2001). Assim, a interação entre o cimento anidro e soluções lixiviadoras, especialmente sob diferentes condições de pH, ainda é pouco compreendida.

A influência do pH das soluções lixiviadoras na hidratação do cimento anidro é um aspecto importante para compreender os mecanismos químicos envolvidos nesse processo. Em condições de pH variado, a cinética de dissolução dos compostos e a nucleação dos produtos hidratados podem sofrer alterações, impactando a estabilidade das fases, alterando o período de indução e a composição química dos hidratos formados. A adição de soluções alcalinas acelera a hidratação do cimento devido à subsaturação das fases sólidas e à interação entre íons de cálcio e pH elevado, enquanto o pH ácido tende a retardá-la (CHEN et al.,2018). Ramachandran e Grutzeck (1993) investigaram a influência do pH na hidratação do silicato tricálcico (C_3S) e observaram que pHs elevados favorecem a formação de hidratos ricos em cálcio, como C-S-H e etringita. Já em pHs ácidos, a precipitação de hidratos é reduzida. Thomas e Double (1981) analisaram a ação do EDTA (ácido etilenodiamino tetra-acético) na hidratação inicial do cimento Portland e do C_3S, evidenciando que uma solução ácida promove maior liberação de silício e um efeito retardador na cinética de hidratação. Esse conhecimento é essencial para avaliar os impactos ambientais da liberação de CPTs do cimento anidro em cenários críticos e assim, entender o impacto da incorporação de resíduos via coprocessamento ou MCS para a saúde humana.

Este trabalho é um recorte de um estudo mais amplo (ROSA, 2024) e, apresenta a otimização das soluções lixiviantes para ensaios de lixiviação em cimentos anidros, utilizando calorimetria isotérmica. Ao analisar o comportamento dos compostos hidratados na cinética de hidratação sob diferentes pHs, busca-se fornecer insights da interação entre cimento anidro e soluções químicas, auxiliando na busca de melhores métodos para avaliar a incorporação de resíduos na produção do cimento e assim auxiliar na mitigação de impactos ambientais associados ao uso e descarte destes materiais.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A metodologia para otimização da solução lixiviadora para cimento anidro desenvolvido neste trabalho foi dividida em duas etapas: i) caracterização dos materiais; ii) definição das soluções para otimização dos ensaios de lixiviação e calorimetria isotérmica do cimento com as soluções propostas iii) validação da solução otimizada no ensaio de lixiviação.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados foram Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CPV-ARI (CPV); soluções básicas (NaOH, 1M), ácidas (HNO_3 65%, HNO_3 20% e H_2SO_4) e álcool isopropílico (60%).

Tabela 1. Composição química e mineralógica do cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CPV-ARI RS (CPV).

Composição dos óxidos (%)	CaO	SiO_2	SO_3	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	SrO	TiO_2	P_2O_5	Na_2O	ZnO	BaO	MnO	Cl	CuO	V_2O_5	ZrO_2	Cr_2O_3
CP V	58,59	14,99	4,81	3,12	2,89	2,67	1,73	0,19	0,16	0,13	0,1	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,01	81 ppm
Fases	C_3S.M1	C_3S.M3	C_3S.T3	C_2S.b	$C_3AcNa_$	C_3Ao	C_3AmNa	C_4AF	Gipsita	Hemidrita	Periclase	Portlandita	Dolomita	Calcita	Acn				
CPV	20,65	27,41	-	14,21	0	-	2,96	3,06	0,97	2,55	1,69	0,86	3,43	4,94	17,29				

* Composição química corrigida pela PF-NBR 17086-6 (ABNT, 2023); ** C= CaO, S= SiO_2, F= Fe_2O_3 e A= $A_{l2}O_3$

A caracterização química e mineralógica do cimento foi obtida por espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX) e difratometria de raios X (DRX), respectivamente. Para o FRX, utilizou-se o equipamento Modelo S8 Tiger da Bruker, em pastilha prensada com base de ácido bórico. O DRX foi realizado no difratômetro de Raio X modelo D8 Advance (Bruker AXS) com radiação Cu Kα (λ = 0,154 nm) a 21 °C e tubo de raios X operado a 40 kV e 40 mA. Os espectros de difração foram obtidos na faixa de 2θ de 10° a 60° e varredura em modo contínuo a 0,02°/3s. As fases cristalinas presentes nos materiais foram identificadas com o auxílio do programa computacional HighScore Plus versão 3.0.5, com base de dados ICSD (Inorganic Crystal Structure Database). A quantificação das fases cristalinas foi realizada pelo método de Rietveld no software GSAS II (TOBY; VON DREELE, 2013). Para a determinação do teor de ACn (fases amorfas e cristalinas não identificadas), utilizou-se o método do padrão interno, sendo corundum (Al_2O_3) o padrão cristalino de referência. A composição química e mineralógica do CP V é apresentada na **Tabela 1**. Conforme esperado, o CPV é formado majoritariamente pelos óxidos que compõe as fases cristalinas majoritárias C_3S, C_2S, C_4AF e C_3A. Além desses óxidos, a análise de FRX mostrou a presença de elementos minoritários como TiO_2, ZnO, BaO, MnO, V_2O_5, Cr_2O_3, PbO (**Tabela 1**). Esses elementos potencialmente contaminantes podem ser provenientes do coprocessamento na etapa de clinquerização ou estar associados aos MCSs adicionados na fabricação dos cimentos.

2.2 DEFINIÇÃO DA SOLUÇÃO DE LIXIVIAÇÃO PARA ANÁLISE DE CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO

As soluções de lixiviação analisadas foram propostas com base nos fatores limitantes da lixiviação: natureza da solução lixiviadora (ácida/ alcalina), solubilidade dos metais e pH. Assim, foram preparadas 8 soluções de lixiviação utilizando base (NaOH), ácidos (HNO_3 65% e H_2SO_4) e o álcool isopropílico, variando as proporções de ácido nítrico, ácido sulfúrico e isopropanol, visando atingir diferentes valores de pH. As soluções e seus respectivos pH são elencadas na Tabela 2.Para investigar os efeitos dessas variações de pH na cinética da hidratação do cimento CPV, foram realizadas análises de calorimetria isotérmica durante 72 horas, no calorímetro TAM Air da TA Instruments, com 8 canais, precisão de 20 µW. Neste ensaio foram utilizados 4g de cimento para 40mL de solução, misturados mecanicamente por 1 minuto a 14.000 rpm, seguida de 1 minuto a 21.000 rpm. A solução de referência foi feita com H_2O deionizada. A partir dos dados da calorimetria foram obtidos parâmetros ligados a cinética de hidratação, como tempo de pega e período de indução, aplicando a metodologia indicada por HU, Jiong et al.(2014).

Tabela 2. Formulação e pH das soluções de lixiviação propostas para análise da lixiviação de cimento CP V anidro.

Solução	NaOH (g)	HNO_3 65% (mL)	H_2SO_4 (mL)	Isopropanol (mL)	pH
1	0,1083	1,875	-	-	0,59
2	0,2	1,375	-	-	0,68
3	0,3042	0,5	-	-	1,57
4	0,4092	0,25	-	-	2,16
5	-	1	-	-	0,65
6	0,2917	0,15	-	6	7,35
7	0,2917	0,15	0,05	6	2,2
8	-	-	0,4	-	0,91

2.4 ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO PARA EFICÁCIA DA OTIMIZAÇÃO DA SOLUÇÃO EXTRATORA

Este tópico integra um estudo mais amplo (ROSA, 2024). No entanto, para validar a relevância da compreensão do pH na otimização da solução extratora para a lixiviação de compostos potencialmente tóxicos (CPTs) em cimento anidro, será apresentada uma etapa resumida aplicada ao CP V. Nessa etapa foram elaborados dois ensaios para comparação. Um procedimento seguindo as normas NBR 10005/ TCLP 1311 e, o segundo ensaio a partir da solução definida 2.2.

O primeiro ensaio de lixiviação seguiu as normas NBR 10005 (ABNT, 2004a) e TCLP 1311. O segundo ensaio, foi selecionada a solução com o período de indução mais longo entre as previamente avaliadas. Para a preparação da solução lixiviante, 6 g do material foram combinados com 60 mL da solução extratora (S/L = 1:10). Três testes de lixiviação foram realizados: TL.1, TL.2 e TL.3. No TL.1, a mistura foi feita manualmente por um minuto; no TL.2 e TL.3, foi utilizada agitação mecânica em alta rotação (14.000 rpm e 21.000 rpm por 2 minutos). O pH foi medido após a mistura e, no TL.2, houve acidificação adicional com HNO_3 a 50%. Todas as amostras foram agitadas mecanicamente a 230 ± 2 rpm a 25 ± 2 °C. O tempo de contato foi definido com base no período de indução, sendo estabelecido em 20 horas para a solução de lixiviação 2(pH 0,68; reagente: 1M NaOH e HNO_3 65%). O objetivo é que a lixiviação acontecesse em um estágio específico de menor taxa de formação de hidratos, período de indução.

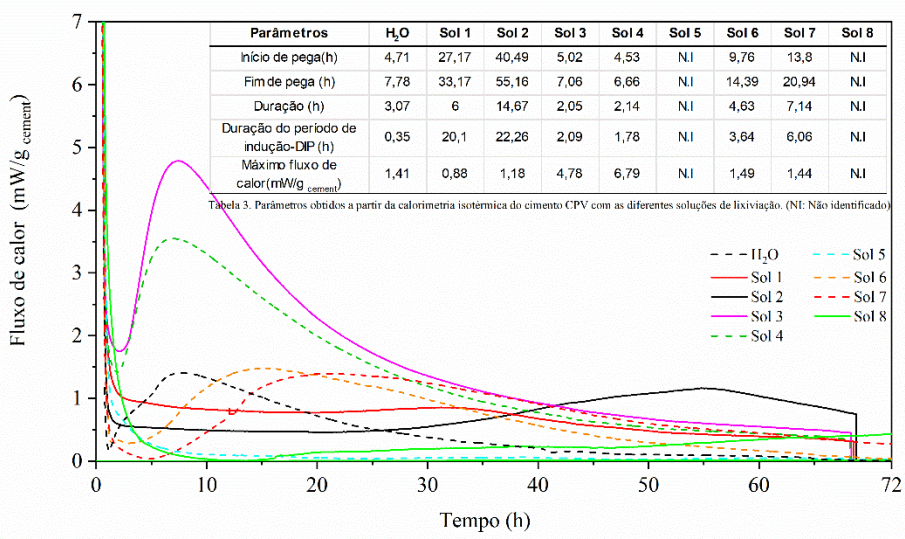
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 apresenta as curvas de fluxo de calor obtidas a partir do ensaio de calorimetria do cimento CPV ARI com as soluções de lixiviação e os parâmetros ligados a cinética da hidratação. A partir das curvas do fluxo de calor liberado pela reação do cimento com as soluções propostas, fica evidente a variedade de efeitos que a solução de lixiviação pode causar na cinética de hidratação do cimento (Figura 1). Em relação a amostra de referência (H_2O),

algumas soluções (a exemplo da 3 e 4) têm o efeito de acelerar as reações de hidratação, que pode estar relacionado ao aumento do fluxo máximo de calor de dissolução do cimento em contato com a solução básica e pico dos silicatos dos hidratos, bem como a redução do período de indução (Figura 1). Este efeito é indesejado, pois a formação precoce de produtos de hidratação pode encapsular uma parte dos CPTs reduzindo o teor disponível para extração por lixiviação. Para a solução 1, caracterizada por um pH de 0,59 e uma concentração de NaOH reduzida a 50% em relação à solução 2, observou-se uma curva cinética que evidencia a degradação da matriz cimentícia. Tal comportamento é indicado pela limitada variação no fluxo de calor após o término do período de indução, conforme ilustrado na Figura 1. Esse comportamento pode ser atribuído à menor concentração de NaOH (solução 1: 0,1083 g; solução 2: 0,2 g). A solução 2, com um pH de 0,68, demonstrou um prolongamento de 22 horas no período de indução. Além disso, exibiu um tempo inicial de pega superior a 23 horas. O prolongamento do período de indução, caracterizado por baixa formação de hidratos, efeito platô, juntamente com prolongamento do tempo inicial de pega, que é responsável pela formação dos silicatos hidratados, faz da solução 2 uma opção viável para o desenvolvimento de metodologias destinadas a esses experimentos específicos de lixiviação para cimento anidro. As soluções 5,6, 8 também evidenciaram degradação da matriz cimentícia. Apesar do pH da solução 5 ser próximo ao da solução 2 (pH: solução 2 = 0,68; solução 5= 0,65), a presença de HNO_3 nessas soluções pode ter sido preponderante para alterar a cinética da hidratação. Para as demais soluções, a degradação observada pode ser atribuída à combinação de ácido e base com baixa concentração de ácido (solução 5) ou à presença de H_2SO_4 (solução 8).

Nota-se que, entre os reagentes avaliados, o NaOH e o HNO_3 a 65% destacaram-se pela influência significativa na cinética de hidratação do cimento. Com base nos ensaios preliminares, para o cimento estudado, a solução 14 demonstrou características favoráveis, como início tardio do período de pega, prolongamento do período de indução. Esses parâmetros indicam que o tempo de indução prolongado e o início da pega após 20 horas são condições em potencial para ensaios de lixiviação, permitindo sua execução por aproximadamente 20 horas (+/-2 horas) antes da hidratação completa, possibilitando máxima lixiviação dos CPTs dispostos.

Figura 1. Curvas de fluxo de calor liberado durante a análise de calorimetria isotérmica do cimento CPV com as diferentes soluções de lixiviação, durante 72 horas.



Parâmetros	H_2O	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Sol 5	Sol 6	Sol 7	Sol 8
Início de pega(h)	4,71	27,17	40,49	5,02	4,53	N.I	9,76	13,8	N.I
Fim de pega (h)	7,78	33,17	55,16	7,06	6,66	N.I	14,39	20,94	N.I
Duração (h)	3,07	6	14,67	2,05	2,14	N.I	4,63	7,14	N.I
Duração do período de indução-DIP (h)	0,35	20,1	22,26	2,09	1,78	N.I	3,64	6,06	N.I
Máximo fluxo de calor(mW/g_{cement})	1,41	0,88	1,18	4,78	6,79	N.I	1,49	1,44	N.I

Tabela 3. Parâmetros obtidos a partir da calorimetria isotérmica do cimento CPV com as diferentes soluções de lixiviação. (NI: Não identificado)

Para validar a eficácia da otimização da solução extratora e a influência do pH no prolongamento do período de indução e na solubilização dos CPTs, são apresentados os resultados dos ensaios de lixiviação (Tabela 3).

Tabela 3. Quantitativo de lixiviação de cimento CP V ARI RS realizado pelo método TCLP e pela metodologia de solução otimizada

Elemento	Al	Ba	Bi	Co	Cr	Cu	In	La	Li	Mo	Ni	Sb	Sr	Sc	Tl	Ti	V	Zn
CP5.TCLP	-	0,83	-	0,03	0,18	0,033	-	-	-	0,34	0,03	0,04	-	0,66	-	0,06	-	0,002
CP5.1	0,06	-	0,02	-	-	-	-	0,57	-	-	-	3,55	-	-	5,49	-	0,41	-
CP5.2	0,11	0,83	0,02	-	0,26	-	0,10	0,13	0,832	-	-	1,98	15,88	-	17,75	-	-	-
CP5.3	0,18	1,53	0,02	-	0,19	-	0,11	0,21	1,045	-	-	2,68	15,80	-	19,28	-	0,02	-

* Unidade de lixiviação: mg/l

As diferenças nos resultados de lixiviação entre o método TCLP e a metodologia proposta (TL.1, TL.2 e TL.3) foram observadas para elementos como Alumínio (Al), Bário (Ba), Cromo (Cr), Lantânio (La), Lítio (Li), Antimônio (Sb),

Estrôncio (Sr), Tálio (Tl) e Vanádio (V). Dentre eles, La, Li, Sb, Sr e Tl apresentaram discrepâncias significativas na quantidade de lixiviados detectados. No caso do La e Li, a metodologia TCLP não permitiu sua detecção, enquanto o método proposto indicou variações de 0,13 a 0,57 mg/L para La e de 0,832 a 1,045 mg/L para Li. O Sb apresentou uma concentração 88 vezes maior na metodologia proposta (3,55 mg/L) em comparação ao TCLP (0,04 mg/L). Além disso, Sr e Tl não foram detectados pelo TCLP, mas apresentaram concentrações elevadas no novo método, atingindo 15,88 mg/L e entre 5,49 e 19,28 mg/L, respectivamente. Essas diferenças substanciais inferem que as condições experimentais dos métodos influenciam a quantidade de compostos potencialmente tóxicos (PTC) lixiviados. Parâmetros como pH, relação sólido/líquido (S/L), composição dos reagentes e o tempo de lixiviação desempenham papéis significativos na quantidade de lixiviados detectados nas amostras de cimento, indicando a necessidade de ajustes metodológicos para obter resultados mais consistentes e precisos.

Com base nos resultados obtidos na quantificação e nos estudos sobre compostos potencialmente tóxicos (CPTs), observou-se que a concentração de bário no lixiviado do ensaio TCLP foi de 0,83 mg/L, enquanto no Teste 3 atingiu 1,53 mg/L. O limite estabelecido pelo TCLP para esse elemento é de 0,001 mg/L. A presença de CPTs no cimento, como o bário, pode representar riscos ocupacionais, especialmente para trabalhadores expostos de forma prolongada. No ambiente, o bário é liberado principalmente na forma de partículas resultantes da queima de combustíveis e da incineração de resíduos. A ingestão de seus sais solúveis pode desencadear efeitos adversos à saúde, como paralisia hipocalêmica e insuficiência respiratória ou cardíaca. Além disso, estudos indicam que a solubilização do $BaSO_4$ no trato gastrointestinal potencializa sua toxicidade ao liberar íons Ba^{2+} na corrente sanguínea (OSKARSSON, 2015). A lixiviação do bário ocorre em diferentes faixas de pH, sendo mais acentuada em condições ácidas. Esses fatores ressaltam a importância da realização de estudos de lixiviação voltados ao cimento anidro, a fim de compreender melhor os mecanismos de liberação desses elementos e seus potenciais impactos.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos evidenciam que as soluções avaliadas têm influência significativa na cinética de hidratação do cimento anidro, destacando-se o papel dos reagentes NaOH e HNO_3 com concentração de 65% como uma solução otimizada para quantificação de CPTs na lixiviação do cimento. A solução 2 demonstrou características promissoras, como prolongamento do período de indução, início tardio do tempo de pega e pH controlado, possibilitando a realização de ensaios de lixiviação antes da formação de fases hidratadas, quantificando a lixiviação máxima de compostos potencialmente tóxicos (CPTs). A análise por calorimetria foi fundamental para identificar as alterações na cinética de hidratação em diferentes formulações e composições de cimento, contribuindo na definição do estágio mais adequado para realizar a lixiviação, definindo o período de indução como metodologia extratora. Em relação ao extrato lixiviado, as diferenças nos resultados de lixiviação entre as metodologias evidenciam a influência das condições experimentais na detecção de CPTs, ressaltando a necessidade de ajustes metodológicos para maior precisão. No entanto, uma abordagem mais abrangente de cada etapa metodológica, assim como discussões mais aprofundadas, está compilada em um estudo mais amplo. Esse trabalho forneceu subsídios para o desenvolvimento de soluções lixiviadoras otimizadas e compreensão do impacto do pH na cinética de hidratação, consequentemente quantificação de CPTs mais eficaz. Além disso, ao permitir uma avaliação mais precisa do impacto ambiental dos cimentos anidros, este estudo pode apoiar o uso mais eficiente de materiais alternativos, como resíduos coprocessados e materiais cimentícios suplementares (SCM). Dessa forma, o estudo trouxe insights para o desenvolvimento de uma metodologia específica voltada ao ensaio de lixiviação em cimentos anidros. Esses insights fazem parte de um estudo mais abrangente de metologia de otimização para lixiviação cimento anidro que será detalhada em um artigo expandido a ser publicado futuramente.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. NBR NM 18. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

BELATO, Mariana Natale. Análise da geração de poluentes na produção de cimento Portland com o coprocessamento de resíduos industriais. 2013.

CHEN, H.; FENG, P.; YE, S.; SUN, W. *The coupling effect of calcium concentration and pH on early hydration of cement*. Construction and Building Materials, v. 185, p. 391–401, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.067.

ESPINOSA, Denise C. R.; TENÓRIO, Jorge A. S. Laboratory study of galvanic sludge's influence on the clinkerization process. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 31, n. 1, p. 71–82, 2000. DOI: https://doi.org/10.1016/S0921-3449(00)00072-0

ENGELSEN, C. J.; VAN DER SLOOT, H. A.; WIBETOE, G.; PETKOVIC, G.; STOLTENBERG-HANSSON, E.; LUND, W. Release of major elements from recycled concrete aggregates and geochemical modelling. Cement and Concrete Research, v. 39, p. 446–459, 2009. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.02.001.

ENGELSEN, C. J.; VAN DER SLOOT, H. A.; WIBETOE, G.; JUSTNES, H.; LUND, W.; STOLTENBERG-HANSSON, E. Leaching characterisation and geochemical modelling of minor and trace elements released from recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Research, v. 40, p. 1639–1649, 2010. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.08.001.

HU, Jiong; GE, Zhi; WANG, Kejin. Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early-age heat of hydration and set times. Construction and building materials, v. 50, p. 657-663, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.011

IEA. Technology Roadmap. Disponível em: https://www.iea.org/energy-system/industry/cement. Acesso em: 14 maio 2024.

LI, X. D.; POON, C. S.; SUN, H.; LO, I. M. C.; KIRK, D. W. Heavy metal speciation and leaching behaviors in cement-based solidified/stabilized waste materials. *Journal of Hazardous Materials*, v. 82, p. 215–230, 2001. https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00360-5.

LV, D.; ZHU, T.; LIU, R.; LI, X.; ZHAO, Y.; SUN, Y.; WANG, H.; ZHANG, F.; ZHAO, Q. Effects of co-processing sewage sludge in the cement kiln on PAHs, heavy metals emissions and the surrounding environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 15, 2018. https://doi.org/10.3390/ijerph15040698.

MALVIYA, R.; CHAUDHARY, R. Leaching behavior and immobilization of heavy metals in solidified/stabilized products. *Journal of Hazardous Materials*, v. 137, p. 207–217, 2006. https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2006.01.056.

OSKARSSON, A. Chapter 29—Barium. In: NORDBERG, G. F.; FOWLER, B. A.; NORDBERG, M. Handbook on the Toxicology of Metals. 4th ed. San Diego: Academic Press, p. 625–634, 2015.

RACT, Paulo Geraldo; ESPINOSA, Denise Crocce Romano; TENÓRIO, Jorge Alberto Soares. Determination of Cu and Ni incorporation ratios in Portland cement clinker. *Waste Management*, v. 23, n. 3, p. 281–285, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00061-2

RAMACHANDRAN, A. R.; GRUTZECK, M. W. *Effect of pH on the Hydration of Tricalcium Silicate*. *Journal of the American Ceramic Society, [s.l.], n.d.* DOI: https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1993.tb03691.x.

ROSA, B.S., *Avaliação de compostos potencialmente tóxicos em cimento anidro: proposta de método quantitativo por ensaios de lixiviação*, Dissertação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2024.

SCHNEIDER, M.; HOENIG, V.; RUPPERT, J.; RICKERT, J. The cement plant of tomorrow. *Cement and Concrete Research*, v. 173, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2023.107290.

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Carbon Emissions Reduction Potential in the Brazilian Cement. Disponível em: http://www.snic.org.br/. Acesso em: 14 maio 2024.

STAFFORD, F. N.; VIQUEZ, M. D.; LABRINCHA, J.; HOTZA, D. Advances and challenges for the co-processing in Latin American cement industry. *Procedia Materials Science*, v. 9, p. 571–577, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/J.MSPRO.2015.05.032.

TOBY, Brian H.; VON DREELE, Robert B. GSAS-II: the genesis of a modern open-source all purpose crystallography software package. **Journal of Applied Crystallography**, v. 46, n. 2, p. 544-549, 2013. DOI: https://doi.org/10.1107/S0021889813003531

THOMAS, N. L.; DOUBLE, D. D. *Calcium and silicon concentrations in solution during the early hydration of Portland cement and tricalcium silicate***, 1981.**

YAN, Da-Hai et al. Coprocessing of industrial and hazardous wastes in cement kilns: a review of current status and future needs in China. *Environmental Engineering Science*, v. 27, n. 1, p. 37–45, 2010. DOI: https://doi.org/10.1089/ees.2009.0144

WANG, L.; JIN, Y.; NIE, Y.; LI, R. Recycling of municipal solid waste incineration fly ash for ordinary Portland cement production: A real-scale test. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 54, p. 1428–1435, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.06.006.