

Avaliação da lixiviação do cromo em concreto pelos métodos de imersão e irrigação

Evaluation of chromium leaching in concrete by immersion and irrigation methods

Elenize Ferreira Maciel¹, Marilise Garbin¹, Regina Célia Espinosa Modolo²,
Marlova Piva Kulakowski¹, Feliciane Andrade Brehm¹

¹Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Núcleo de Caracterização de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 93022-750, São Leopoldo, RS, Brasil.

²Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Núcleo de Caracterização de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Mecânica, 93022-750, São Leopoldo, RS, Brasil.

e-mail: elenizefm@gmail.com, mgarbin@edu.unisinos.br, reginaem@unisinos.br, marlovak@unisinos.br, felicia-neb@unisinos.br

RESUMO

A busca por materiais na construção civil ecoeficientes pode ser realizada adicionando ou substituindo as matérias-primas por resíduos gerados em outros setores industriais. Muitos destes resíduos são classificados como perigosos, sendo que a inertização dos compostos que conferem periculosidade pode ser realizada através da estabilização por solidificação (E/S) que ocasiona o encapsulamento e a fixação química de substâncias tóxicas. No entanto, no Brasil não há uma norma regulamentada ou mesmo uma recomendação técnica, que seja específica para produtos E/S utilizados como componentes de construção. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a lixiviação do cromo em matriz de concreto de cimento Portland pelos métodos de imersão e irrigação, com vistas ao emprego destes métodos na avaliação ambiental de materiais e componentes da construção civil. Para isso, foram confeccionados corpos de prova de 25x200x400 mm com e sem adição de 2% de Cr₂O₃ (óxido de cromo) em relação a massa do cimento Portland, os quais foram submetidos a testes de lixiviação por imersão e irrigação. Os resultados obtidos permitiram verificar o encapsulamento do cromo no concreto e que os testes de lixiviação propostos em monólitos de concreto, durante a fase de uso, mostraram-se aplicáveis em 28 dias.

Palavras-chave: Avaliação ambiental. Estabilização por solidificação. Lixiviação. Cromo. Concreto. Cimento Portland.

ABSTRACT

The search for materials in eco-efficient civil construction can be carried out by adding or replacing raw materials with waste generated in other industrial sectors. Many of these residues are classified as hazardous, and the inertization of compounds that confer dangerousness can be performed through stabilization by solidification (S/S) that causes the encapsulation and chemical fixation of toxic substances. However, in Brazil there is no regulated standard or even a technical recommendation, which is specific for S/S products used as building components. In this context, the present study aimed to evaluate the leaching of chromium in Portland cement concrete matrix by immersion and irrigation methods, with a view to the use of these methods in the environmental assessment of materials and components of civil construction. For this, specimens of 25x200x400 mm were made with and without the addition of 2% Cr₂O₃ (chromium oxide) in relation to the Portland cement mass, which were subjected to immersion and irrigation leaching tests. The results obtained allowed to verify the encapsulation of chromium in the concrete and that the leaching tests proposed in concrete monoliths, during the use phase, proved to be applicable in 28 days.

Keywords: Environmental assessment. Stabilization by solidification. Leaching. Chromium. Concrete. Portland cement.

1. INTRODUÇÃO

Os materiais à base de cimento representam em torno de 1/3 do consumo global de materiais [1] e durante sua vida útil, são responsáveis por gerar quase a mesma quantidade de resíduos [2]. Nos últimos anos, houve um crescimento do uso de resíduos sólidos como matéria-prima na construção civil, permitindo a redução de custos, em relação a sua disposição final, e impactos ambientais negativos pela extração da matéria-prima do meio ambiente [3]. Com isso passou a se ter um aumento da indústria da reciclagem dos resíduos sólidos, transformando os mesmos em produtos ecoeficientes com valor agregado.

Muitos metais tóxicos presentes em solos ou efluentes industriais, são remediados pela redução de seus teores, através da técnica de estabilização por solidificação (E/S), dentre estes se encontram resíduos com cromo (Cr). O Cr é um elemento que pode estar presente em produtos de diversas indústrias, tais como galvanoplastia, siderurgia, preservação de madeiras, pigmentos e curtumes [4-10], sendo muito utilizado pelas indústrias curtumeiras no Estado do Rio Grande do Sul, no curtimento, para evitar a putrefação do couro. Segundo KRUMMENAUER e ANDRADE [11] em torno de 30% do couro processado em curtumes são rejeitados, gerando resíduos contendo sais de cromo.

A E/S são métodos de tratamento que visam melhorar a forma de manipulação e características físicas e químicas dos resíduos, reduzindo sua área superficial através da transferência ou perda de poluentes, limitando assim que qualquer constituinte tóxico contido no resíduo contamine o ambiente [12-14]. A E/S tem como finalidade principal reduzir a mobilidade do contaminante pela sua imobilização química ou física, o transformando em formas menos solúveis [15-19].

No entanto produtos E/S podem apresentar perigo potencial para o meio ambiente e a saúde das pessoas em diferentes fases de seu ciclo de vida. Segundo SCHIOPU *et al.* [20] é na fase de uso que os produtos E/S podem inferir danos ao meio ambiente, ocasionando prejuízos ao solo e a água, toxicidade e problemas de saúde para as pessoas onde o material está exposto.

No Brasil não há uma norma regulamentada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ou mesmo uma recomendação técnica, que seja específica para resíduos submetidos à E/S em componentes de construção durante sua fase de uso. Desta forma, por não haver no país uma norma ou recomendação específica, os testes aplicados para produtos E/S são realizados conforme a norma brasileira NBR 10.005 [21], que descreve os procedimentos para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, onde os resíduos que apresentarem teores de poluentes no extrato lixiviado em concentrações maiores do que as estipuladas pela NBR 10.004 [22] são classificados como perigosos. A NBR 10.005 [21] utiliza a amostra fragmentada ($\leq 9,5$ mm), simulando situações de disposição final em aterro, não considerando o comportamento dos produtos durante a fase de uso.

Neste contexto este estudo tem como objetivo avaliar a lixiviação de Cr em matriz de concreto de cimento Portland pelos métodos de imersão e irrigação, com vistas ao emprego destes métodos na avaliação ambiental de materiais e componentes da construção civil. Contudo, neste trabalho adotou-se o uso de óxido de cromo (Cr_2O_3) para simular o contaminante contido no concreto. Pois, além do Cr ser um metal tóxico, suas concentrações acima de 5 mg/L de acordo com a NBR 10.005 [21] classificam o material como perigoso.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Estabilização por solidificação (E/S)

A E/S é uma técnica amplamente utilizada em resíduos, onde visa impedir a migração e exposição de contaminantes ao ambiente [12]. Segundo WILES [23], BRITO [24] e TREZZA e SCIAN [25], a solidificação pode ser definida como um processo no qual o resíduo é encapsulado formando um material sólido, podendo ou não envolver interações químicas entre contaminantes e aglomerantes. Já, a estabilização, se refere ao processo em que o contaminante fica total ou parcialmente encapsulado, se convertendo em um formato mais estável quimicamente, dando condições para minimizar a solubilidade, mobilidade e periculosidade dos componentes presentes no material, podendo ou não ocorrer modificação nas características dos resíduos [23-25].

Desta forma, a E/S pode ser entendida como duas etapas que se completam, e que ocorrem no momento em que os agentes aglomerantes entram em contato com os contaminantes e resíduos, sendo então aprisionados quando fixados na matriz e reduzindo sua migração para o meio ambiente [26, 27]. Entre os agentes aglomerantes destacam-se o cimento Portland, hidróxido de cálcio, asfalto, argilas, polietileno e polímeros orgânicos [24].

O processo de E/S dos resíduos em materiais cimentícios é considerado como uma das técnicas mais eficientes estudadas, devido principalmente ao pH alcalino. Substâncias alcalinas, como o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, são am-

plamente utilizadas para tecnologias de imobilização combinadas com o tratamento de resíduos perigosos [28], podendo realizar o encapsulamento físico e a fixação química de substâncias tóxicas. Estudos anteriores incorporando escória com cromo [8], cinza de bagaço de cana de açúcar [5], lodo de fosfatização [29], lodo galvânico [30, 31] e aparas de couro [25] com cimento Portland mostraram-se eficientes na E/S destes resíduos que apresentavam cromo em sua composição.

A técnica de E/S, ainda apresenta mecanismos que inibem a dispersão dos contaminantes, também modificando a solubilidade, por controlar o pH, formando combinações químicas insolúveis e encapsulamento dos contaminantes [26, 27]. Consequentemente, as vantagens da técnica de E/S estendem-se para benefícios ambientais, por evitar passivos ambientais, reduzindo assim prejuízos ambientais relativos à disposição final e minimizando os impactos ambientais negativos decorrentes da extração de matérias-primas diretamente do ambiente.

2.2 Métodos de lixiviação aplicados em produtos E/S

Os testes de lixiviação são considerados as principais ferramentas para a verificação da eficiência de um processo de E/S e são aplicados para verificar o potencial de liberação de contaminantes de um material sob condições controladas em laboratório [32]. Sendo que seus resultados são utilizados para estimar a lixiviação em diferentes cenários de gerenciamento, verificando se estão dentro dos limites estipulados pelas normas ambientais [33].

No Brasil a norma NBR 10.005 [21] é utilizada para realizar a avaliação ambiental de produtos E/S, quando na verdade, a norma fixa os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Ao longo do tempo as agências ambientais, principalmente na Europa e Estados Unidos, constataram que métodos com amostras fragmentadas não eram representativos em situações onde as amostras eram sólidas, como produtos E/S, desta forma elaboraram normas que fossem aplicáveis em diferentes situações, onde as amostras poderiam ser granulares [34-45], sólidas em forma de monólito [46-48] e procedimentos tanto para amostras granulares ou sólidas em uma mesma norma [49, 50].

Na Tabela 1 é apresentada as diferenças entre os procedimentos de lixiviação descritos nos métodos aplicados na Europa, Estados Unidos e Brasil.

Tabela 1: Comparação de parâmetros de métodos nos testes de lixiviação

ORIGEM	MÉTODO	MEIO LÍQUIDO	RELAÇÃO AMOSTRA: LÍQUIDO	PERÍODO	FORMA DA AMOSTRA	PROCEDIMENTO
Europa	EN 15863 [46]	Água deionizada	8 mL/cm ²	36 dias	Monólito Dimensões mínimas 40 mm	Renovação da solução
	EN 15862 [47]	Água deionizada	12 mL/cm ²	24 horas	Monólito Dimensões mínimas 40 mm	Agitação
	UNI EN 12457-1 [34]	Água deionizada	1:2	24 horas	Granular < 4 mm	Agitação
	UNI EN 12457-2 [35]	Água deionizada	1:10	24 horas	Granular < 4 mm	Agitação
	UNI EN 12457-3 [36]	Água deionizada	1:2 e 1:8	6 e 18 horas	Granular < 4 mm	Agitação
	UNI EN 12457-4 [37]	Água deionizada	1:10	24 horas	Granular < 10 mm	Agitação
	CEN TS 14405 [38]	Água deionizada	1:10	Calculado em função do fluxo	Granular < 4 mm	Coluna
	NEN 7347 [39]	Água deionizada	-	64 dias	Granular < 4 mm	Renovação da solução
	NEN 7373 [40]	Água deionizada	1:0,1 e 1:10	Calculado em função do fluxo	Granular e pó	Coluna
	NEN 7375 [48]	Água deionizada	1:5	64 dias	Monólito	Renovação da solução
	NF X31-211 [49]	Água deionizada	1:10	16 a 48 horas	Monólito ou granular (10 a 20 mm)	3 renovações da solução (agitação)
Estados Unidos	Método 1311 [41]	Solução ácida pH 4,93 ± 0,05 ou pH 2,88 ± 0,05	1:20	18 horas	Granular (≤9,5mm)	Agitação
	Método 1312 [42]	Solução ácida pH 4,20 ± 0,05 ou pH 5 ± 0,05	1:20	18 horas	Granular (≤9,5mm)	Agitação
	Método 1313 [43]	Água com adições de HNO ₃ ou NaOH	10 mL/g	24, 48 ou 72 horas	Granular <0,3; 2 ou 5 mm	9 extrações (10 se o pH natural estiver fora da faixa alvo)
	Método 1314 [44]	Água ou 1 mol CaCl ₂	10 mL/g	13 dias	Granular <2 e 5 mm	9 frações
	Método 1315 [50]	Água deionizada	9 mL/cm ²	63 dias	Monólito: cilindro ou cubo; Dimensão mínima de 40 mm Granulado compactado: cilindro com altura mínima de 40 mm	9 renovações da solução
	Método 1316 [45]	Água deionizada	10; 5; 2; 1; 0,5 mL/g	24, 48 ou 72 horas	Granular <0,3; 2 ou 5 mm	5 extrações
Brasil	NBR 10.005 [21]	Solução ácida pH 4,93 ± 0,05 ou pH 2,88 ± 0,05	1:20	18 horas	Granular (≤9,5mm)	Agitação

Pode-se observar na Tabela 1 que cada método apresenta características diferentes, como o tipo de solução utilizada, relação amostra:líquido, período e a forma que as amostras são submetidas aos ensaios. Sendo que estas características são muito importantes e influenciam diretamente nos resultados da lixiviação.

Um aspecto importante a ser observado e que pode influenciar nos resultados dos ensaios é o pH da solução, pois à medida que se diminui o pH, a liberação de metais aumenta. Assim, alguns metais são mais solúveis em condições ácidas, o que pode ser atribuído à tendência de metais para formar óxidos de metal solúveis em ambientes ácidos [51].

Diferentes valores de relações amostra:líquido também podem influenciar os resultados, porque em menor relação as concentrações são maiores. Essas concentrações diminuem com o aumento da relação amostra:líquido, pois há diluição do material. Sendo que, quanto menor for o tempo de contato entre o material e o líquido, menor será a proporção da concentração de constituintes liberados [52].

Outro fator muito importante é a forma de como a amostra é analisada, pois quando o material sólido possui uma maior área superficial, ou seja, menor for a granulometria das partículas sólidas, ocorre uma dissolução mais efetiva no extrato lixiviado, devido a maior área de contato entre a amostra e a solução [52].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado neste estudo foi o cimento Portland CPV – ARI, com massa específica de 3,12 g/cm³. Sua composição química está apresentada na Tabela 2 e foi determinada por fluorescência de raios X em equipamento modelo EDX 720 HS - Shimadzu.

Tabela 2: Composição química do cimento Portland CP V – ARI

COMPOSTO	%
SiO ₂	17,98
Al ₂ O ₃	4,36
Fe ₂ O ₃	2,59
CaO	63,27
MgO	4,46
K ₂ O	0,86
Na ₂ O	0,42
SO ₃	2,80
TiO ₂	0,22
P ₂ O ₅	0,13
Cr ₂ O ₃	0,01
ZnO	0,01
MnO	0,07
SrO	0,21
Perda ao fogo	2,67

Com base na NBR 7215 [51] foi determinada a resistência à compressão axial do cimento Portland CP V – ARI aos 7 e 28 dias de cura. Os resultados indicam uma tendência de aumento da resistência a compressão conforme avançou a idade dos corpos de prova, aos 7 dias (29,0 MPa) e 28 dias (32,60 MPa). Isso acontece, pois, as partículas não hidratadas de cimento permanecem formando produtos de hidratação, que faz com que ocorra uma redução do tamanho e do volume total de vazios, aumentando assim a resistência à compressão.

3.1.2 Agregados

O agregado miúdo empregado no estudo possui massa específica de $2,59 \text{ g/cm}^3$, determinada de acordo com a NBR NM 52 [54] e dimensão máxima de 4,8 mm. Já o agregado graúdo, é de origem basáltica, com massa específica de $2,77 \text{ g/cm}^3$, determinada de acordo com a NBR NM 53 [55] e dimensão máxima de 12,5 mm.

Os dados obtidos do ensaio de granulometria dos agregados, realizado conforme NBR 248 [56] são apresentados na Figura 1. O agregado graúdo apresentou um módulo de finura de 7,40 e o agregado miúdo de 2,21.

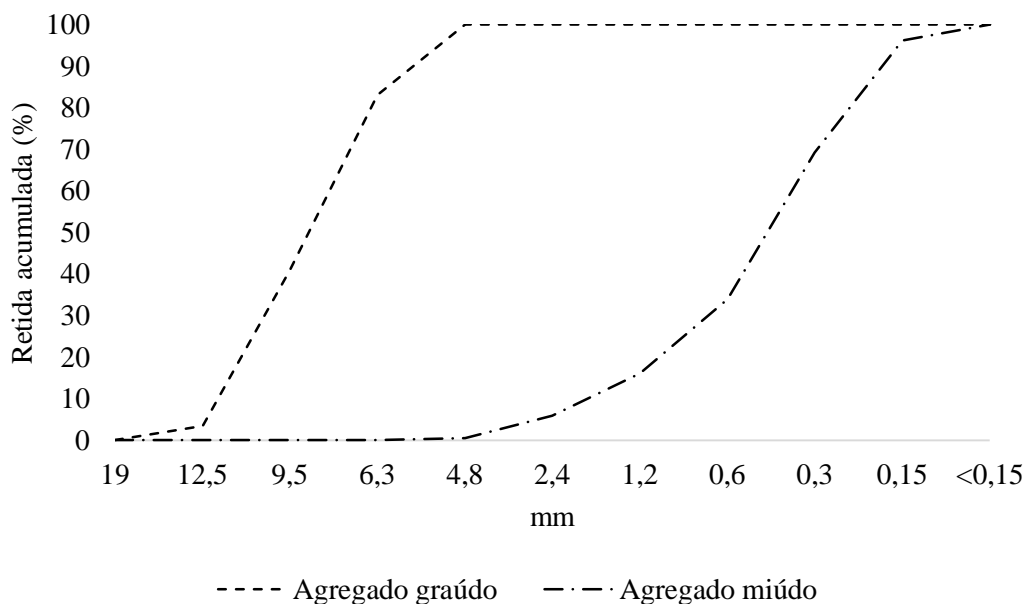


Figura 1: Curva granulométrica dos agregados

3.1.3 Óxido de cromo (Cr_2O_3)

O Cr_2O_3 é apresentado em forma de pó com coloração verde escura. Com pureza de 98%, conforme dados presentes no certificado de análises do fabricante Sigma Aldrich Brasil.

A caracterização do Cr_2O_3 foi realizada através das análises de granulometria por difração a laser (equipamento Particle Analyser Microtrac – S3500), fluorescência de raios X (equipamento modelo EDX 720 HS – Shimadzu) e difração de raios X (difratômetro Siemens D5000, com radiação incidente de $\text{CuK}\alpha$, em um intervalo de leitura de 5° a 100° (2θ)).

A distribuição granulométrica por difração a laser determinou que 90% da amostra possui diâmetro de partícula inferior a $6,36 \mu\text{m}$, sendo o diâmetro médio igual a $2,12 \mu\text{m}$.

Na Tabela 3 está presente a composição química qualitativa do Cr_2O_3 . Pode-se observar que o Cr_2O_3 empregado neste estudo é caracterizado como um produto constituído majoritariamente por Cr, sendo que os elementos traço (Si e Fe) encontrados na análise podem ser provenientes de pequena impureza contida no óxido.

Tabela 3: Composição química do Cr_2O_3

ELEMENTOS IDENTIFICADOS		
Majoritários (> 50%)	Minoritários (5% < x < 50%)	Traço (< 5%)
Cromo (Cr)	-	Silício (Si)
		Ferro (Fe)

Na Figura 2 os picos identificados na difração de raios X corroboram com os resultados encontrados na fluorescência de raios X (Tabela 3), onde a presença de Cr foi majoritária.

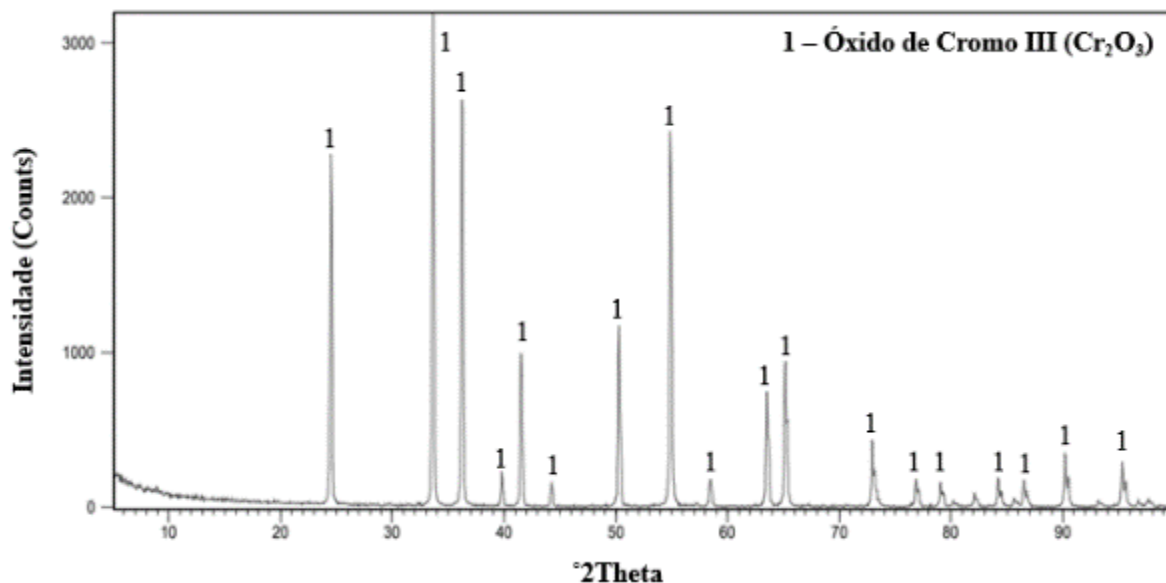


Figura 2: Difratograma do Cr_2O_3

O emprego do Cr_2O_3 teve por finalidade simular o Cr total contido no resíduo incorporado ao concreto, atribuindo potencial perigoso ao resíduo, conforme a NBR 10.004 [22]. Trezza e Scian [25], em estudo, apontaram que resíduos de aparas de couro, provenientes da indústria coureiro calçadista, tem em torno de 2% de Cr_2O_3 em sua composição. Com isso, foi adicionado 2% em massa de Cr_2O_3 ao cimento para confecção do concreto.

3.2. Método

Para realização do programa experimental, a metodologia foi dividida em 3 etapas:

- Etapa 1: produção dos corpos de prova de concreto;
- Etapa 2: caracterização da solução lixiviante e do lixiviado proveniente dos ensaios de lixiviação;
- Etapa 3: aplicação do método de lixiviação para testar produtos E/S (imersão e irrigação).

3.2.1 Programa experimental

Para o programa experimental foram produzidos concretos com teor de argamassa em 55% e 8,7% de umidade, em três relações água/cimento (0,42; 0,53 e 0,65) de referência e com adição de 2% de Cr_2O_3 . Os corpos de prova foram confeccionados em fôrmas de compensado plastificado de 20 mm, com dimensões de 200x400x25 mm. Na Tabela 4 pode-se visualizar a formulação dos concretos empregados no estudo.

Tabela 4: Formulação dos concretos

AMOSTRAS	RELAÇÃO A/C	CIMENTO (%)	AREIA (%)	BRITA (%)	ÁGUA (%)	Cr_2O_3 (%)
T1 Ref	0,42	19,91	30,46	41,23	8,40	0
T1 2%	0,42	19,91	30,46	41,23	8,40	2
T2 Ref	0,53	16,00	34,38	41,13	8,49	0
T2 2%	0,53	16,00	34,38	41,13	8,49	2
T3 Ref	0,65	13,25	37,09	41,06	8,60	0
T3 2%	0,65	13,25	37,09	41,06	8,60	2

3.3.1 Proposta de método

Os testes de lixiviação, propostos nesta pesquisa, teste de imersão e teste de irrigação, seguem o método aplicado no estudo realizado por LUNKES *et al.* [57], no qual os autores desenvolveram um método para simular uma condição real de exposição da amostra à chuva ácida (teste de irrigação) e ao contato mais prolongado

com uma solução ácida, simulando um alagamento (teste de imersão). Porém, por se tratar de ensaios de laboratório, os sistemas foram construídos em uma escala reduzida e de exposição da amostra a ciclos de molhagem e secagem. Onde a temperatura para a execução dos testes, foi de $23 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade de $70 \pm 5\%$.

a) Solução lixiviante

Para uso nos dois testes de lixiviação foi composta uma solução de ácido nítrico 0,1 N ajustada para $\text{pH } 3,0 \pm 0,05$ utilizando ácido nítrico (65%).

Tomou-se, como base para o dimensionamento do volume de solução lixiviante, a média da precipitação mensal do maior nível de precipitação (140 mm) registrado pelo Instituto de Meteorologia na estação de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, nos últimos 9 anos [58]. Para o teste de irrigação, o cálculo do volume de solução foi realizado através do cálculo da área do corpo de prova exposta à solução, multiplicado pela média da precipitação mensal ($0,2 \text{ m} \times 0,4 \text{ m} = 0,08 \text{ m}^2 \times 140 \text{ mm}$) resultando em 11,2 litros. Para o teste de imersão adotou-se o mesmo volume, resultando em uma relação amostra:líquido de 1:5,6.

Na Figura 3 pode-se verificar que todas as soluções lixiviantes utilizadas nos testes de imersão e irrigação mostraram valores de pH dentro do limite estabelecido de $3 \pm 0,05$.

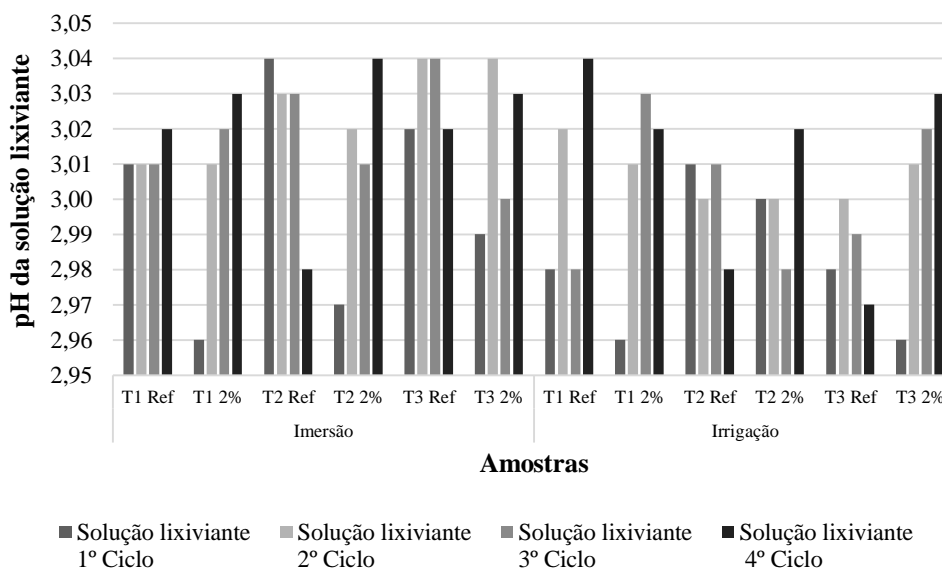


Figura 3: Valores de pH das soluções lixiviantes

b) Teste de imersão

O teste consiste na imersão dos corpos de prova em tanques de vidro (Figura 4), preenchido com solução lixiviante. O ciclo da renovação da solução lixiviante foi de 4 ciclos de 7 dias, totalizando 28 dias de imersão. Em cada renovação da solução lixiviante, o lixiviado foi coletado, medido o pH, após acidificado com HNO_3 até $\text{pH} < 2$, refrigerado, em câmara fria, com temperatura de $5^\circ\text{C} (\pm 0,05^\circ\text{C})$ por 30 dias, de acordo com o método do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [59]. Por fim foi realizada a análise de espectrometria de emissão ótica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), que tem como objetivo verificar a quantidade de Cr total no lixiviado.



Figura 4: Ensaio em execução do teste de lixiviação por imersão

c) Teste de irrigação

O teste de irrigação consiste no gotejamento da solução lixiviante sobre o corpo de prova (Figura 5) dentro de tanques de vidro. Na parte superior dos tanques, foram instalados barriletes de PVC com capacidade de 20 litros, que têm como função armazenar e abastecer os tanques com a solução lixiviante, de forma contínua e com vazão constante. O barrilete foi posicionado 20 cm acima dos tanques onde a solução lixiviante foi gotejada nos corpos de prova.

A irrigação por gotejamento da solução lixiviante foi realizada com uma vazão média de 7,8 mL/min, com controle da vazão em proveta graduada, com auxílio de um cronômetro. O processo de molhagem e secagem do corpo de prova ocorreu em 4 ciclos, que compreenderam: molhagem do corpo de prova por irrigação de gotas da solução lixiviante durante 24 horas e secagem do corpo de prova em umidade e temperatura controladas por 6 dias, totalizando 28 dias de ensaio. A cada ciclo o lixiviado foi coletado, medido o pH, após acidificado com HNO_3 até $\text{pH} < 2$ e mantido sob refrigeração, em câmara fria, com temperatura de $5^\circ\text{C} (\pm 0,05^\circ\text{C})$ por 30 dias, de acordo com o método do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [59]. Ao final desse período foi realizada análise por ICP-OES, visando verificar a quantidade de Cr total presente no lixiviado.



Figura 5: Ensaio em execução do teste de lixiviação por irrigação

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Testes de lixiviação por imersão e irrigação

4.1.2 Potencial hidrogeniônico (pH) do extrato lixiviado

Conforme pode-se visualizar na Figura 3, inicialmente a solução lixiviante apresentava pH ácido ($3 \pm 0,05$), sendo observado na Figura 6 que após 4 ciclos de testes de lixiviação o pH do extrato lixiviado foi alterado aproximadamente para entre 10 e 11 (imersão) e entre 6 e 7 (irrigação). Esse aumento de pH pode estar associado ao pH do cimento Portland, que pode variar de pH 12,5 a 13,5 [60]. Esta elevação do pH, pode ter ocorrido devido a carbonatação dos corpos de prova de concreto, pela combinação do CO_2 com Ca(OH)_2 , causando assim alterações de valores do pH [61], pelo excesso de portlandita na amostra já hidratada [60].

Esta elevação no pH, também pode ser explicada, pois uma das características da química dos fluídos dos poros é alta concentração de cátions de metais alcalinos [61, 62]. Como os silicatos e aluminatos são relativamente insolúveis, estes cátions são em sua maioria originários do Ca(OH)_2 que possivelmente elevam o pH da solução dos poros.

Neste estudo, o valor do pH no teste de lixiviação, por imersão, foi superior ao encontrado no teste de lixiviação por irrigação, devido a imersão total da amostra na solução durante os quatro ciclos de lixiviação, o que favorece a dissolução dos cátions de metais alcalinos.

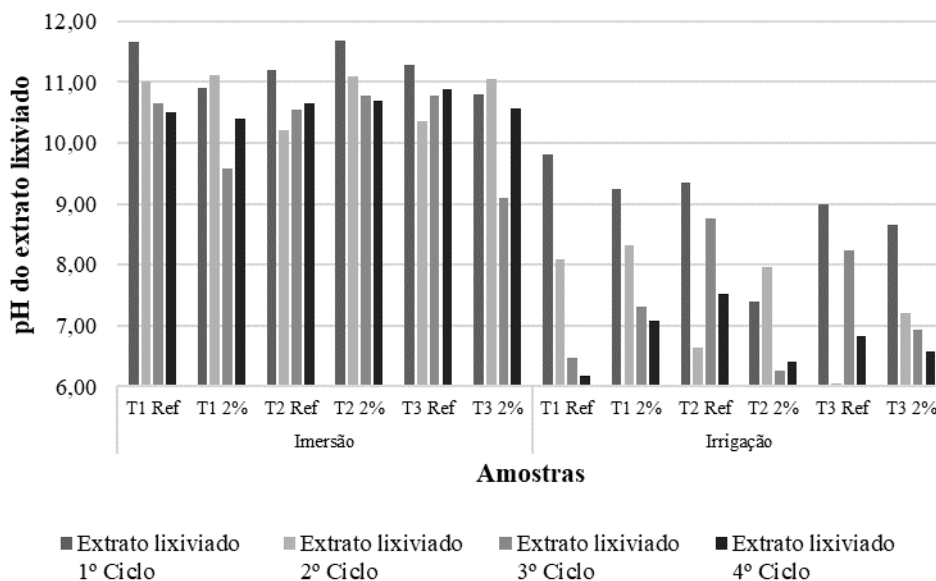


Figura 6: Valores de pH verificados no extrato lixiviado

4.1.3 Espectrometria de emissão ótica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES)

Os resultados das análises por ICP-OES das soluções lixivantes de água deionizada e ácido nítrico (65%) mostraram que em nenhuma das soluções foi detectada lixiviação por Cr.

Conforme dados da Tabela 6, a lixiviação no teste de imersão ocorreu desde o 1º ciclo para todas as amostras, sendo o Cr estabilizado no 2º ciclo. Os mesmos resultados foram apresentados no teste de lixiviação, por irrigação, também estabilizando o Cr no 2º ciclo. Mesmo com o Cr estabilizando no 2º ciclo, sugere-se considerar 4 ciclos para que seja possível garantir a lixiviação do cromo em outras condições de ensaio.

Tabela 5: Concentração de Cr (em mg/L) no extrato lixiviado

TESTE	AMOSTRA	EXTRATO LIXI-VIADO 1º CICLO	EXTRATO LIXI-VIADO 2º CICLO	EXTRATO LIXI-VIADO 3º CICLO	EXTRATO LIXI-VIADO 4º CICLO
Imersão	T1 Ref	0,007	<LD	<LD	<LD
	T1 2%	0,010	<LD	<LD	<LD
	T2 Ref	0,005	<LD	<LD	<LD
	T2 2%	0,006	<LD	<LD	<LD
	T3 Ref	0,008	<LD	<LD	<LD
	T3 2%	<LD	<LD	<LD	<LD
Irrigação	T1 Ref	<LD	<LD	<LD	<LD
	T1 2%	0,003	<LD	<LD	<LD
	T2 Ref	<LD	<LD	<LD	<LD
	T2 2%	0,006	<LD	<LD	<LD
	T3 Ref	<LD	<LD	<LD	<LD
	T3 2%	<LD	<LD	<LD	<LD

Limite de detecção da análise: 0,00055 mg/L

A presença de Cr no extrato lixiviado dos corpos de prova de referência (T1 Ref, T2 Ref e T3 Ref) do teste de imersão, pode ser justificada devido à presença de 0,01% de Cr₂O₃ na composição química do ci-

mento Portland (Tabela 2). Possivelmente, devido à alta solubilidade do Cr em HNO_3 , o mesmo foi detectado via ICP-OES em concentração $\leq 0,008$ mg/L. Cabe salientar que mesmo com essa pequena detecção, ocorrida no 1º ciclo, nos ciclos subsequentes o Cr foi totalmente encapsulado não sendo mais detectado a partir do 2º ciclo de lixiviação por imersão. Sendo que para os corpos de prova com 2% de Cr (T1 2%, T2 2% e T3 2%) foi detectada lixiviação de Cr em concentrações $\leq 0,010$ mg/L somente no 1º ciclo do teste.

A análise das amostras de extrato lixiviado, obtidas no teste de lixiviação por irrigação, indicou presença de Cr somente no 1º ciclo, com concentrações de Cr $\leq 0,006$ mg/L, para o T1 2% e T2 2%.

Ao comparar os resultados da concentração de Cr dos extratos lixiviados, obtidos por ambos os métodos, observa-se uma tendência favorável de estabilização do Cr nos corpos de prova em matriz de cimento Portland. Estabilizando o Cr_2O_3 na matriz de concreto em ambos os testes.

Estes resultados são importantes quando comparados aos obtidos no presente trabalho, pois reforçam a crítica ao emprego do método da NBR 10.005 [21] para avaliar a E/S em componentes de construção civil. Sendo importante a proposta do método para o emprego de amostras íntegras (monólitos) na execução da avaliação ambiental destes produtos.

Na Figura 5 é possível visualizar o aspecto, em geral observado, de corpos de prova de concreto sem teste (A – REF e B 2% Cr), teste de imersão (C – REF e D 2% Cr) e teste de irrigação (E – REF e F 2% Cr).

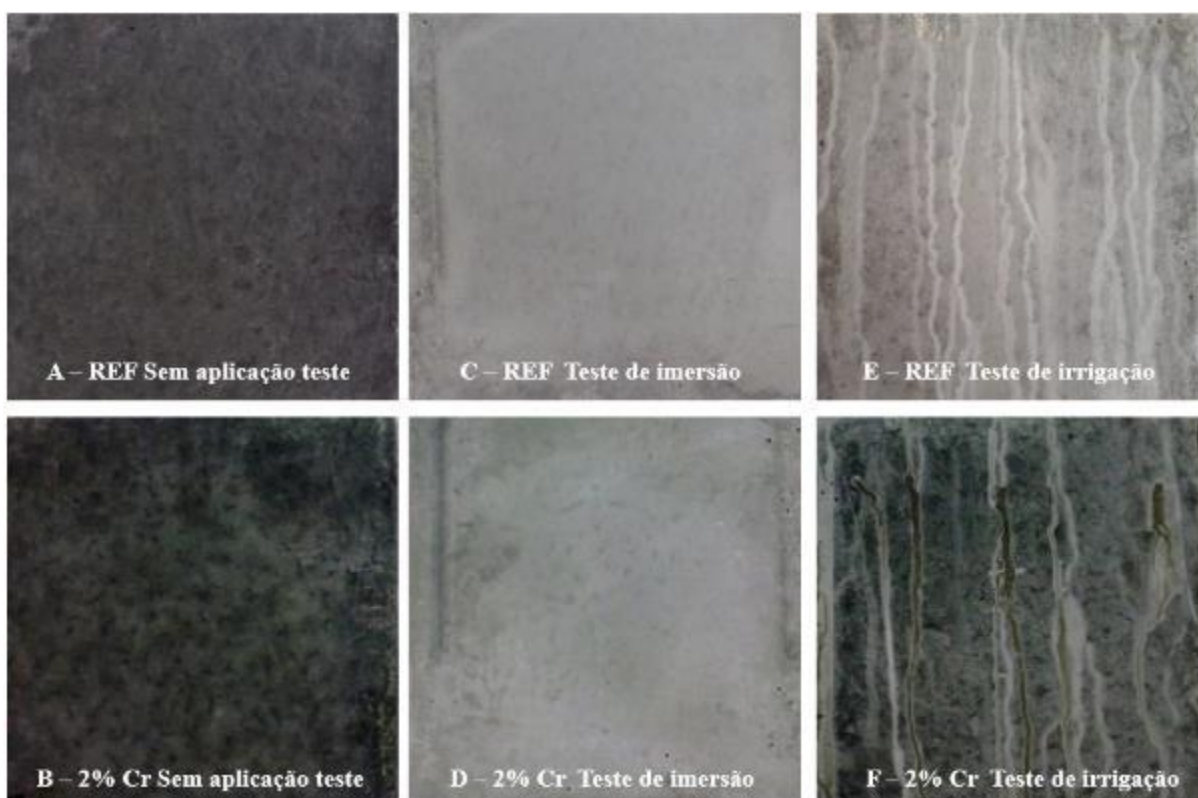


Figura 7: Aspecto dos corpos de prova de concreto sem teste (A – REF e B 2% Cr), teste de imersão (C – REF e D 2% Cr) e teste de irrigação (E – REF e F 2% Cr)

Observando a Figura 5 e os resultados da Tabela 6, é possível inferir que os mecanismos de lixiviação observados para os corpos de prova submetidos ao teste por imersão tenham sido de dissolução e difusão, pois os corpos de prova foram submersos em solução ácida com capacidade de dissolução e remoção do Cr. Conforme JAIN e NEITHALATH [63], o gradiente de concentração de Ca entre a água livre circundante, que penetra nos poros da matriz de cimento, e a solução dos poros pode promover a remoção dos íons cálcios dissolvidos, até o meio externo, por difusão. Esta remoção diminui a concentração de Ca na solução dos poros e esta diminuição de concentração pode levar à dissolução de produtos hidratados de cimento, abastecendo a solução dos poros com mais Ca. Contudo, alguns autores, como HJELMAR e VAN DER SLOOT [64] colocam que, em monólitos de materiais cimentícios, a lixiviação é principalmente controlada por difusão, sendo este o mecanismo de controle da lixiviação do Cr [65, 66]. No presente trabalho, este parece ser o me-

canismo que rege a remoção do Cr também nos testes de lixiviação por imersão.

Para os corpos de prova submetidos ao teste por irrigação, pode-se inferir que os mecanismos de lixiviação observados foram de lavagem superficial e difusão. Segundo VAN DER SLOOT e DIJKSTRA [67], a lavagem superficial é o mecanismo de lixiviação que ocorre na parte externa de produtos monolíticos devido aos compostos solúveis, sendo normalmente o principal mecanismo de transporte de materiais monolíticos antes do mecanismo de difusão. Neste caso, o contato da solução lixiviante com o corpo de prova foi por gotejamento, se espalhando pela superfície dos corpos de prova, criando um desgaste no alinhamento do ponto em que as gotas entravam em contato com a superfície e ao longo da região por onde escoavam na amostra. Este desgaste pode ser observado na Figura 5 (E), nos corpos de prova REF e nos corpos de prova com 2% de Cr (F), lixiviando o Cr pela lavagem superficial e fazendo com que ocorresse a migração do Cr para a superfície, por difusão e pelos ciclos de secagem e molhagem dos corpos de prova.

Deve-se considerar também que durante a realização dos testes (imersão e irrigação) houve a geração de efluentes que, por sua vez, precisam ser tratados antes de serem destinados à rede de coleta de esgoto. Estes efluentes foram gerados tanto na manutenção dos reservatórios (limpeza), quanto no descarte do excedente de extrato lixiviado. No presente estudo, após 4 ciclos foi gerado efluente com volume total de aproximadamente 538 L. O programa experimental completo deste estudo gerou aproximadamente 1613 L de efluente, devidamente tratado e controlado pelo SGA (Sistema de Gestão Ambiental) da Universidade.

5. CONCLUSÕES

- Os resultados obtidos para os testes de lixiviação por imersão e por irrigação, demonstraram que a execução de 2 ciclos seria suficiente para avaliar a E/S do Cr.

- Verificou-se que o tempo de 14 dias para a execução dos testes, nestas condições experimentais, são suficientes para avaliar a lixiviação do Cr em matriz de concreto de cimento Portland pelos métodos de imersão e irrigação. Para tanto sugere-se que os ensaios sejam executados em 28 dias (4 ciclos) para que seja possível garantir a lixiviação do cromo em outras condições de ensaio.

- A concentração de Cr obtida para o teste de lixiviação por imersão (inundação) foi maior do que a concentração deste elemento para o teste de lixiviação por irrigação (chuva ácida).

- Os testes realizados neste estudo são passíveis de reprodução em escala laboratorial, pois não demandam materiais e infraestrutura complexa. Salienta-se ainda a necessidade de tratamento adequado para os efluentes gerados.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas de pesquisa concedidas.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] WIEDMANN, T. O., SCHANDL, H.; LENZEN, M., *et al.*, “The material footprint of nations”. *PNAS*. v. 112, n. 20, pp. 6271-6276, 2015.
- [2] VIEIRA, L. B. P., FIGUEIREDO, A. D., MORIGGI, T., *et al.*, “Waste generation from the production of ready-mixed concrete”. *Waste Management*. v. 94, pp. 146-152, 2019.
- [3] KULAKOWSKI, M. P., BREHM, F. A., KAZMIERCZAK, C. DE S., *et al.*, “Contribuição à avaliação ambiental de materiais e componentes construtivos: proposta de método para obtenção de extrato lixiviado”. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 4, pp. 69-81, 2014.
- [4] HU, J., XIAO, Z., ZHOU, R., *et al.*, “Ecological utilization of leather tannery waste with circular economy model”. *Journal of Cleaner Production*. v. 19, pp. 221-228, 2011.
- [5] TANTAWY, M. A., EL-ROUDI, A. M., SALEM, A. A., “Immobilization of Cr (VI) in bagasse ash blended cement pastes”. *Construction and Building Materials*. v. 30, pp. 218-223, 2012.
- [6] FEI, Y., LIU, C., “Detoxification and resource recovery of chromium-containing wastes”. In: Prasad, M. N. V., Shih, K. (ed.). *Environmental Materials and Waste Resource Recovery and Pollution Prevention*. Netherlands: Elsevier. pp. 265-284, 2016.
- [7] CHENG, S., SHUI, Z., YU, R., *et al.*, “Durability and environment evaluation of an eco-friendly cementbased material incorporating recycled chromium containing slag”. *Journal of Cleaner Production*. v. 185, pp. 23-31, 2018.

- [8] TASCIA, A. L., PUCCINI, M., “Leather tanning: Life cycle assessment of retanning, fatliquoring and dyeing”. *Journal of Cleaner Production*. v. 226, pp. 720-729, 2019.
- [9] SILVA, B. C. L.; GACHET, L. A.; LINTZ, R. C. C. Análise microscópica de concreto pigmentado com resíduos de borracha aplicado em piso intertravado. *Matéria* (Rio de Janeiro) [online], v. 25, n. 04, 2020.
- [10] ALBUQUERQUE, G. B.; BALLMANN, T. J. S.; FOLGUERAS, M. V.; PRIM, S. R. Síntese de pigmento cerâmico verde com base na estrutura cristalina da wollastonita. *Matéria* (Rio de Janeiro) [online], v. 21, n. 2, p. 355 – 364, 2016.
- [11] KRUMMENAUER, K., ANDRADE, J. J. O., “Incorporation of chromium-tanned leather residue to asphalt micro-surface layer”. *Construction and Building Materials*. v. 23, pp. 574–581, 2009.
- [12] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S EPA). Technology performance review: Selecting and using solidification/stabilization treatment for site remediation. U.S, 2009.
- [13] WANG, Y. S., DAI, J. G., WANG, L., *et al.*, “Influence of lead on stabilization/solidification by ordinary Portland cement and magnesium phosphate cement”. *Chemosphere*. v. 190, pp. 90-96, 2018.
- [14] LI, W., NI, P., YI, Y., “Comparison of reactive magnesia, quick lime, and ordinary Portland cement for stabilization/solidification of heavy metal-contaminated soils”. *Science of the Total Environment*. v. 671, pp. 741–753, 2019.
- [15] LÓPEZ, I., OLMO, I. F., IRABIEN, A., “Mechanical properties and environmental assessment of mortars containing metallic oxides”. *Journal of Environmental Engineering*. v. 132, pp. 949-955, 2006.
- [16] KARAMALIDIS, A. K., VOUDRIAS, E. A., “Leaching behavior of metals released from cement-stabilized/solidified refinery oily sludge by means of sequential toxicity characteristic leaching procedure”. *Journal of Environmental Engineering*. v. 134, pp. 493-504, 2008.
- [17] SINGHAL, A., TEWARI, V.K., PRAKASH, S., “Characterization of stainless steel pickling bath sludge and its solidification/stabilization”. *Building and Environment*, v. 43, pp. 1010-1015, 2008.
- [18] GUO, X., ZHANG, L., HUANG, J., *et al.*, “Detoxification and solidification of heavy metal of chromium using fly ash-based geopolymers with chemical agents”. *Construction and Building Materials*. v.151, pp. 394-404, 2017.
- [19] RADENOVIC, D., KERKEZ, D., PILIPOVIC, D. T., *et al.*, “Long-term application of stabilization/solidification technique on highly contaminated sediments with environment risk assessment”. *Science of the Total Environment*. v. 684, pp. 186-195, 2019.
- [20] SCHIOPU, N., TIRUTA-BARNA, L., JAYRA E., *et al.*, “Modelling and simulation of concrete leaching under outdoor exposure conditions”. *Science of the total environment*. v. 407, pp.1613-1630, 2009.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10.005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10.004: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- [23] WILES, C.C., “A review of solidification/stabilization technology”. *Journal of Hazardous Materials*, n. 14, p. 5-21, 1987.
- [24] BRITO, A. L. F., “Protocolo de avaliação de materiais resultantes da estabilização por solidificação de resíduos”, Tese de D.Sc., PPGA/UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2007.
- [25] TREZZA, M.A., SCIAN, A.N., “Waste with chrome in the Portland cement clinker production”. *Journal of Hazardous Materials*. v. 147, pp. 188–196, 2007.
- [26] MALVIYA, R., CHAUDHARY, R., “Factors affecting hazardous waste solidification/stabilization industrial waste”. *Journal of Hazardous Materials*, v. 137, n. 1, pp. 267–276, 2006.
- [27] UCAROGLU, S., TALINLI, I., “Recovery and safer disposal of phosphate coating sludge by solidification/stabilization”. *Journal of Environmental Management*. v. 105, pp. 131-137, 2012.
- [28] AKCIL, A., ERUST, C., OZDEMROGLU, S., *et al.*, “A review of approaches and techniques used in aquatic contaminated sediments: metal removal and stabilization by chemical and biotechnological processes”. *Journal of Cleaner Production*, v. 86, pp. 24-36, 2015.
- [29] BREHM, F. A., KULAKOWSKI, M. P., CALHEIRO, D., *et al.*, “Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil”. *Revista Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 13, n. 2, pp. 15-27, 2013.
- [30] CHEN, Y. L., KO, M. S., LAI, Y. C., *et al.*, “Hydration and leaching characteristics of cement pastes made from electroplating sludge”. *Waste Management (Elmsford)*. v 31, pp. 1357–1363, 2011.
- [31] ALVES, L. C., SEO, E. S. M., “Caracterização do resíduo sólido proveniente do processo galvânico para valoração econômica ambiental”. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.19, n.4, pp. 423-434, 2014.
- [32] VAN DER SLOOT, H. A., KOSSON, D. S., VAN ZOMEREN, A., “Landfilling of different kinds of waste: Leaching behavior”. In: COSSU, R.; STEGMANN, R. (org.). *Solid Waste Landfilling: Concepts, Processes, Technologies*. Amsterdã: Elsevier, cap. 20, pp. 1077 – 1093, 2018.
- [33] VAN DER SLOOT, H.A., KOSSON, D.S., IMPENS, N., *et al.*, “Leaching assessment as a component of environmental safety and durability analyses for NORM containing building materials”. In: SCHROEYERS, W (org.). *Naturally Occurring Radioactive Materials in Construction*. Cambridge: Woodhead Publishing, cap. 8, pp. 253-288, 2017.

- [34] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *CEN EN 12457-1*: Leaching characteristics – Determination of the availability of inorganic components for leaching – Solid earthy and stony materials. UK. 2004.
- [35] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *CEN EN 12457-2*: Leaching characteristics – Determination of the availability of inorganic components for leaching – Solid earthy and stony materials. UK. 2004.
- [36] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *CEN EN 12457-3*: Leaching characteristics – Determination of the availability of inorganic components for leaching – Solid earthy and stony materials. UK. 2004.
- [37] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *CEN EN 12457-4*: Leaching characteristics – Determination of the availability of inorganic components for leaching – Solid earthy and stony materials. UK. 2004.
- [38] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *CEN TS 14405*: Characterization of waste - Leaching behaviour tests - up-flow percolation test (under specified conditions). UK. 2004.
- [39] ENVIRONMENT AGENCY. *EA NEN 7347*: Leaching characteristics of solids earthy and stony building and waste materials – Leaching tests - Determination of the leaching of inorganic components from compacted granular materials. UK. 2006.
- [40] ENVIRONMENT AGENCY. *EA NEN 7373*: Leaching characteristics - Determination of the leaching of inorganic components from granular materials with a column test - Solid earthy and stony materials. UK. 2004.
- [41] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *U.S EPA Method 1311*: Toxicity characteristic leaching procedure. U.S., 1992.
- [42] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *U.S EPA Method 1312*: Synthetic precipitation leaching procedure. U. S., 1994.
- [43] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *U.S EPA Method 1313*: Liquid-solid partitioning as function of extract pH using a parallel batch extraction procedure. U.S., 2012.
- [44] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *U.S EPA Method 1314*: Liquid-solid partitioning as a function of liquid-solid ratio for constituents in solid materials using an up-flow percolation column procedure. U. S., 2013.
- [45] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *U.S EPA Method 1316*: Liquid-solid partitioning as a function of liquid-solid ratio using a parallel batch extraction procedure. U. S., 2012.
- [46] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *CEN EN 15863*: Characterization of waste - Leaching behaviour test for basic characterization - Dynamic monolithic leaching test with periodic leachant renewal, under fixed conditions. UK. 2015.
- [47] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *CEN TS 15862*: Characterisation of waste - Compliance leaching test - One stage batch leaching test for monoliths at fixed liquid to surface area ratio (L/A) for test portions with fixed minimum dimensions. EU. 2012.
- [48] ENVIRONMENT AGENCY. *EA NEN 7375*: Leaching Characteristics of Moulded or Monolithic Building and Waste Materials Determination of Leaching of Inorganic Components with the Diffusion Test. The Tank Test. UK. 2004.
- [49] ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION. *AFNOR NFX 31-211*: Leaching characteristics – Determination of the availability of inorganic components for leaching – Solid earthy and stony materials. FR. 2012.
- [50] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *U.S EPA Method 1315*: Mass transfer rates of constituents in monolithic or compacted granular materials using a semi-dynamic tank leaching procedure. U. S., 2013.
- [51] BASEGIO, T. M., “Imobilização do íon cromo oriundo de cinzas de incineração de serragem de couro em corpos cerâmicos vitrificados”, Tese de D.Sc., PPGEM/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2004.
- [52] VAN DER SLOOT, H. A., “Quick techniques for evaluating the leaching properties of waste materials: their relation to decisions on utilization and disposal”. *Trends in analytical chemistry*, v. 17, n. 5, pp. 298-310, 1998.
- [53] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 7215*: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- [54] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR NM 52*: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- [55] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR NM 53*: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- [56] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR NM 248*: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- [57] LUNKES, M., KOSTE, E. C., KULAKOWSKI, M. P., *et al.*, “Leaching of chromium in red ceramic monolith by immersion and irrigation”. *Key Engineering Materials*, v. 634, pp. 307-317, 2015.
- [58] CENTRO INTEGRADO DE COMANDO (CEIC). Disponível em: http://www2.portoalegre.rs.gov.br/ceic/default.php?p_secao=28, acessado em setembro de 2020.
- [59] AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). *Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater*, 22nd Ed.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, DC, 2012.
- [60] VAN DER SLOOT, H. A., HEASMAN, L., QUEVAUVILLER, P., “Harmonization of Leaching/Extraction Tests.

Studies in Environmental Science”. *Elsevier Science*. Bilthoven, v. 70, 1997.

[61] PETER, M. A., MUNTEAN, A., MEIER, S. A., *et al.*, “Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study”. *Cement and Concrete Research*, v. 38, pp. 1385-1393, 2008.

[62] KINDNESS, A., MACIAS, A., GLASSER, F. P., “Immobilization of chromium in cement matrices”. *Waste Management*, v. 14, n. 1, pp. 3-11, 1994.

[63] JAIN, J., NARAYANAN, N., “Analysis of calcium leaching behavior of plain and modified cement pastes in pure water”. *Cement & Concrete Composites*, v. 31, pp.176–185, 2009.

[64] HJELMAR, O., VAN DER SLOOT, H. A., “Landfilling: Mineral Waste Landfills”. In: CHRISTENSEN, T. H. (org.). *Solid Waste Technology & Management*. Hoboken: Blackwell Publishing, cap. 10.5, p. 755-771, 2011.

[65] SOPHIA, A. C., KANCHANA, S., “Assessment of the mechanical stability and chemical leachability of immobilized electroplating waste”. *Chemosphere*, v. 58, pp.75–82, 2005.

[66] LAFOREST, G., DUCHESNE, J., “Investigation of stabilization/solidification for treatment of electric arc furnace dust: Dynamic leaching of monolithic specimens”. *Cement and Concrete Research*, v. 37, pp.1639-1646, 2007.

[67] VAN DER SLOOT, H. A., DIJKSTRA, J.J., “Development of Horizontally Standardized Leaching Tests for Construction Materials: A Material Based or Release Based Approach? Identical leaching mechanisms for different leaching materials”, ENC: Energy Commission of the Netherlands -C-04-060, Petten, 56p, 2004.

ORCID

Elenize Ferreira Maciel	http://orcid.org/0000-0002-5062-4669
Marilise Garbin	http://orcid.org/0000-0001-9509-3606
Regina Célia Espinosa Modolo	http://orcid.org/0000-0001-7088-2502
Marlova Piva Kulakowski	https://orcid.org/0000-0002-7661-3909
Feliciane Andrade Brehm	http://orcid.org/0000-0002-3272-5837