

III-522 – AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, HIDRÁULICAS, QUÍMICAS E MINERALÓGICAS DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO PARA UTILIZAÇÃO COMO MATERIAL FILTRANTE/SUBSTRATO EM WETLANDS CONSTRUÍDAS

Lívia Santos Pereira⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade Veiga de Almeida (UVA).

Marcos Vinicius Rodrigues Tavares⁽²⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Veiga de Almeida (UVA).

Marcel Rocha Soares Lopes⁽³⁾

Geógrafo pela Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ). Mestre e Doutor em Geografia (UFRJ).

Lídia Yokoyama⁽⁴⁾

Engenheira Química pela Universidade Federal do Pará. Mestre em Engenharia Metalúrgica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Doutora em Química (PUC-Rio).

Diego Macedo Veneu⁽⁵⁾

Engenheiro Ambiental pela Universidade Severino Sombra (USS), Mestre em Engenharia de Materiais, Processos Químicos e Metalúrgicos (PUC-Rio). Doutor em Tecnologia em Processos Químicos e Bioquímicos (UFRJ).

Endereço⁽⁴⁾: Av. Athos da Silveira Ramos, 149, CT – Bloco A, 2º andar – Cidade Universitária – Rio de Janeiro – RJ – CEP: 21941-909 - Brasil - Tel: (21) 3938-7676 - e-mail: diegomveneu@yahoo.com.br

RESUMO

O presente estudo tem por objetivo, determinar alguns parâmetros físicos, hidráulicos, mineralógicos e químicos de 5 resíduos minerais para serem posteriormente utilizados como material filtrante/substrato em sistemas de Wetlands Construídas. Os ensaios para determinar a distribuição granulométrica das partículas que constituem os resíduos de mineração mostraram que 4 amostras mostram um perfil semelhante com boa distribuição das partículas nas diferentes frações (0,075 a 9,52 mm) e somente uma amostra possui uma tendência de distribuição granulométrica mais concentrada nas frações de 0,075 a 0,95 mm. Os valores médios de diâmetro efetivo (d_{10}) de todas as amostras foram inferiores a 0,20 mm. Os valores do coeficiente de uniformidade (CU) variaram de 10 a 18 para as amostras de 2 a 4 e para as amostras 1 e 5 os valores foram de 5,55 e 4,77, respectivamente. O coeficiente de curvatura (Cc) dos resíduos variaram de 0,79 a 0,96 para as amostras de 2 a 5, e a amostra 1 o valor obtido foi de 0,43. Independentemente do método utilizado (Hazen, de Kozeny-Carman e de Darcy), as amostras de 1 a 4 apresentaram permeabilidades saturadas maiores que $1.10^{-4} \text{ m s}^{-1}$, somente a amostra 5 apresentou uma variação considerável entre os métodos utilizados, aplicando as equações de Hazen e Kozeny-Carman e pelo permeâmetro, correspondendo aos valores de $8,15.10^{-3}$, $2,77.10^{-4}$ e $3,95.10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, respectivamente. O mineral mais expressivo em todas as amostras é o quartzo (SiO_2), variando de 27 a 44,5% entre as amostras de 1 a 4 e chegando a 81,4% na amostra 5. Na amostra 1 foi identificado também o mineral muscovita, nas amostras de 1 a 4 os minerais microclina e ortoclásio, e por fim, o mineral albita nas amostras de 2 a 4. Em relação a composição elementar, as amostras 1 e 5 apresentam concentrações elevadas de Hg, Pb e Al. Já as amostras de 2 a 4, o elemento a ser levado em consideração é o Al. Em relação aos macro e micronutrientes, chama a atenção a concentração de alguns elementos como Mg na amostra 5, de S na amostra 1, de Cu nas amostras 1 e 5 e Fe na amostra 1.

PALAVRAS-CHAVE: Material Filtrante; diâmetro efetivo; coeficiente de uniformidade; condutividade hidráulica saturada; composição mineralógica e elementar

INTRODUÇÃO

Nas primeiras Wetlands Construídas (WCs) o material empregado foi o solo in natura como elemento filtrante e de sustentação para as macrófitas. O tipo de material filtrante/substrato vem merecendo bastante atenção, devido, principalmente, a necessidade de se manter as condições hidráulicas para que o processo de tratamento ocorra. Busca-se, portanto, um material capaz de manter ao longo do tempo boas condições de fluxo (condutividade hidráulica

saturada) aliado a um potencial reativo, ou seja, capaz de promover adsorção de compostos inorgânicos presentes nos efluentes.

As WCs com macrófitas, quando aplicadas ao tratamento de efluentes, geralmente são compostas por areias e/ou brita. As areias são os materiais mais empregados e mais bem conhecidos, sendo, inclusive, transcritas na literatura recomendações quanto aos seus índices granulométricos e as suas propriedades hidráulicas, destacando-se: o diâmetro efetivo (d_{10}) ($\geq 0,20$ mm); o coeficiente de uniformidade (CU) (≤ 5 unidades); coeficiente de permeabilidade saturada ou condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) ($\geq 10^{-4}$ m/s) (Sezerino, 2006). Por outro lado, o país também conta com uma intensa atividade mineral responsável por gerar enormes quantidades de resíduos e/ou rejeitos (Outlook Globalfert, 2021). De acordo com IPEA (2012) em seu último relatório que estimou a geração de resíduos/rejeitos no decênio 1996-2005, projetou para o ano de 2030 a produção de cerca de 684 milhões de toneladas. Os resíduos gerados em mineradoras podem ser minérios pobres, estéreis, rochas, lamas, rejeitos finos e ultrafinos não aproveitados no beneficiamento, dentre outros.

Há estudos com materiais filtrantes alternativos, sendo na sua grande maioria compostos por rochas ou minerais: mármore (Arias et al., 2001), calcita (Ann et al., 1999), vermiculita (Arias et al., 2001), bentonita (Xu et al., 2006), dolomita (Ann et al., 1999), calcários (Tao e Wang 2009; Mateus et al., 2012) e zeólita (Bruch et al., 2011). Em geral materiais filtrantes/substratos como areia, cascalho e brita não possuem elevada capacidade adsorptiva para fósforo e nitrogênio, mas, por outro lado, possuem alta condutividade hidráulica saturada. Alguns autores descrevem que ao realizarem misturas de diferentes substratos houve um ganho na remoção de nutrientes mantendo uma boa condutividade hidráulica saturada (Prochaska; Zouboulis, 2006; Li et al., 2011).

Sendo assim, o presente estudo tem por objetivo, determinar alguns parâmetros físicos, hidráulicos, mineralógicos e químicos de 5 resíduos minerais para serem posteriormente utilizados como material filtrante/substrato em sistemas de Wetlands Construídas. Foram realizados ensaios para determinar a distribuição granulométrica das partículas que constituem os resíduos de mineração; o do coeficiente de uniformidade (CU) e o coeficiente de curvatura (Cc) dos resíduos; a permeabilidade saturada destes resíduos por meio dos métodos de Hazen, de Kozeny-Carman e de Darcy; além das principais fases mineralógicas que compõem os resíduos através da análise de difração de raios-X (DRX); e a composição elementar dos resíduos através da análise de espectrometria de emissão óptica e absorção atômica (ICP-OES e AAS).

MATERIAIS E MÉTODOS

Identificação e Descrição das Amostras

As amostras de resíduos utilizadas neste trabalho foram obtidas de diferentes mineradoras localizadas na região Centro-Oeste do Brasil. A Tabela 1 mostra a identificação numérica de cada amostra e suas respectivas descrições.

Tabela 1. Identificação e descrição das amostras de resíduos de mineração

Amostra	Descrição
1	Folhelho - Rocha sedimentar argilosa
2	Filler - Granito
3	Pó de Pedra - Granito
4	Granito Cinza
5	Curimã - Rejeito da Mineração de Ouro

Distribuição Granulométrica

Para realização dos ensaios de peneiramento as amostras de resíduos foram levadas a uma estufa para secagem e quebra dos torrões em partículas pequenas. Após a secagem, as amostras foram divididas em cinco subamostras por meio de um quarteador de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a) e posteriormente submetidas a peneiramento em um agitador de peneira Ro Tap de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016b) com a seguinte sequência de peneiras: 9,52 ; 4,75 ; 2,0 ; 0,85 ; 0,43 ; 0,25 ; 0,15 e 0,075 mm. Após 10 min de peneiramento, as amostras foram retiradas do equipamento e levadas para pesagem para determinação da massa retida em cada peneira, sendo em seguida, efetuado o somatório das massas e calculados os percentuais de massa retida, acumulada e passante. A massa específica das partículas foi determinada conforme a NBR 6458 (ABNT, 2016c) com cinco repetições por resíduo.

Coeficiente de Uniformidade e de Curvatura

O diâmetro efetivo se refere ao tamanho da peneira que deixa passar 10% em massa da amostra. Já o coeficiente de uniformidade (Eq. 1), é dado pela relação entre o tamanho da peneira que deixa passar 60% (d_{60}) em massa da amostra e o diâmetro efetivo. O coeficiente de curvatura (Eq. 2) mede a graduação das amostras com base na média dos diâmetros d_{30} , d_{60} e d_{10} . Para determinação precisa dos coeficientes de uniformidade e de curvatura, utilizaremos as equações descritas por (Bardet, 1997):

$$CU = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad \text{equação (1)}$$

$$Cc = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \cdot d_{10}} \quad \text{equação (2)}$$

Onde: d_{10} , d_{30} e d_{60} é o diâmetro da peneira onde foi observado a massa percentual passante abaixo de 10, 30 e 60%, respectivamente.

Permeabilidades Saturadas

Para determinação direta das permeabilidades saturadas utilizou-se um permeâmetro de carga constante de bancada, com 6,0 pol de diâmetro, sob gradiente hidráulico de 0,5, conforme NBR 13292 (ABNT, 1995). As temperaturas da água foram ajustadas a 20°C. Após equilibradas as cargas hidráulicas nos piezômetros, realizaram-se 5 leituras de vazão em cada amostra e procedeu-se o cálculo da velocidade aparente média de fluxo (k), conforme Darcy (Eq. 3), sendo posteriormente transformada em velocidade real (k'), dividindo k pela porosidade do molde de resíduo, de acordo com Hornberger et al., (1998) (Eq. 4). As porosidades foram obtidas a partir dos índices de vazios, calculados com base nas massas específicas aparente seca dos moldes (ρ_d) e pelas massas específicas das partículas (ρ_s).

$$k_{sat} = \frac{Q}{i \cdot A} \quad \text{equação (3)}$$

Onde: Q = vazão ($m^3 s^{-1}$); i = gradiente hidráulico ($\Delta h/\Delta L$); A = área da seção transversal (m^2).

$$k'_{sat} = \frac{k}{n} \quad \text{equação (4)}$$

Onde: k' = velocidade real de fluxo ($m s^{-1}$); k = velocidade aparente de fluxo ($m s^{-1}$); n = porosidade total do molde.

Alternativamente, realizaram-se estimativas indiretas das permeabilidades saturadas com base na distribuição granulométrica, conforme a equação de Hazen (Eq. 5), ou nesta última combinada com o índice de vazios máximo, determinado segundo a NBR 16840 (ABNT 2020), e com o fator de forma das partículas (S_f), conforme a equação de Kozeny-Carman modificada por Carrier (2003) (Eq. 6):

$$k_{sat} = c \cdot (d_{10})^2 \quad \text{equação (5)}$$

Onde: d_{10} é o diâmetro efetivo; $c = 1,0$ a $1,5$;

$$k_{sat} = 1,99 \cdot 10^4 \left[\frac{100}{\sum_{\frac{D_{ai}}{D_{bi}}} \frac{f_i}{D_{bi}^{0,404} \cdot D_{bi}^{0,595}}} \right] \cdot \left(\frac{1}{S_f} \right)^2 \cdot \left(\frac{e^3}{1+e} \right) \quad \text{equação (6)}$$

Onde: f_i é o percentual de partículas retido entre duas aberturas de peneira; D_{ai} e D_{bi} são, respectivamente, as aberturas superior e inferior de cada intervalo de peneira; S_f é o fator de forma das partículas (variando de 6 para angulosas e 8 para arredondadas); e é o índice de vazios máximo.

Composição Mineralógica

As composições mineralógicas dos resíduos foram obtidas a partir dos difratogramas de raios X pelo método do pó em um equipamento Bruker-D4 Endeavor, com as seguintes condições de operação: radiação $Co K\alpha$ (35 kV/40 mA); velocidade do goniômetro de $0,02^\circ 2\theta$ por passo com tempo de contagem de 1 segundo por passo e coletados de 5 a $80^\circ 2\theta$. As interpretações qualitativas de espectro foram efetuadas por comparação com padrões contidos no banco de

dados PDF02 em software Bruker DiffracPlus. Portanto, o cálculo foi realizado pelo método de refinamento de espectro multifásico total (Método de Rietveld), com software Bruker AXS Topas, v. 3.0.

Composição Elementar - Espectrometria de Emissão Óptica e Absorção Atômica

Para determinação dos elementos contidos nas amostras de resíduos foi necessário a decomposição de cerca de 10 g de cada amostra através de abertura por água régia (HCl e HNO₃) para posterior leitura no ICP-OES modelo Optima DV 4300 (Perkin Elmer) de Al, Na, K, Ca, Mg, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, Pb, As, Mo, P e S. Para determinação de Hg a decomposição foi realizada com água régia (HCl e HNO₃) e soluções oxidantes (K₂Cr₂O₇ e HNO₃.HCl) para posterior leitura em AAS modelo SpectrAA-55B (Agilent).

RESULTADOS OBTIDOS

Distribuição Granulométrica, Coeficiente de Uniformidade e de Curvatura

Na Figura 1 estão as distribuições granulométricas das amostras de resíduos de mineração. As amostras de 1 a 4 mostram um perfil semelhante com boa distribuição das partículas nas diferentes frações. Somente a amostra 5 possui uma tendência de distribuição granulométrica mais concentrada nas frações de 0,075 a 0,95 mm.

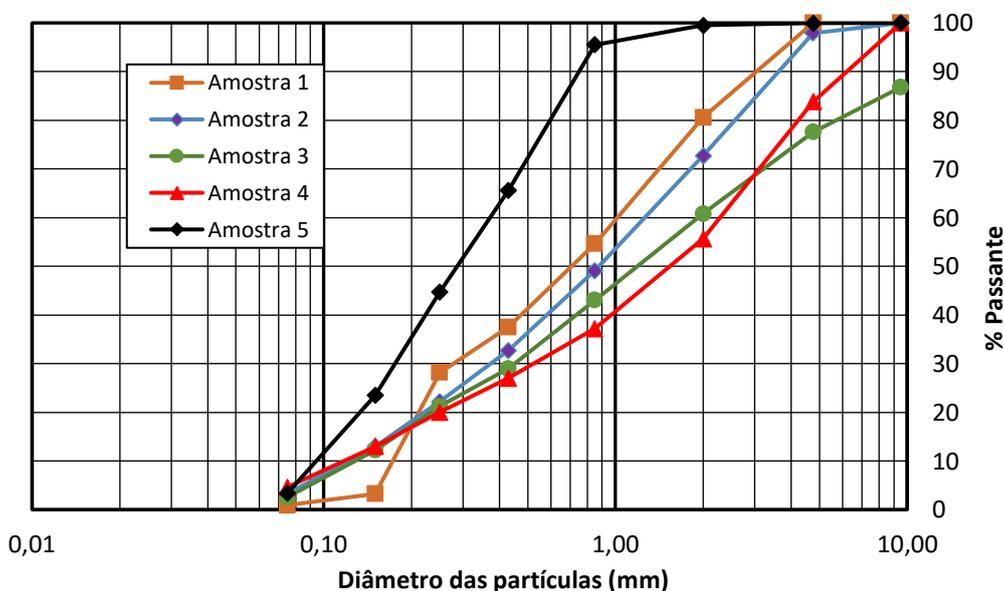


Figura 1: Curvas granulométricas dos resíduos de mineração.

Os valores médios de diâmetro efetivo (d_{10}) de todas as amostras foram inferiores a 0,20 mm (Tabela 2). Os valores médios de coeficientes de uniformidade (CU) e de curvatura (Cc), obtidos a partir das distribuições granulométricas estão na Tabela 2. Todos os resíduos foram classificados de acordo com o Sistema Unificado, como areias mal graduadas (SP). As amostras 1 e 5 apresentaram um CU mais próximo de 5,0 e as demais amostras apresentaram valores acima de 10,0. Já o Cc das amostras de 2 a 5 permaneceram na faixa de 0,79 a 0,96, e a amostra 1 apresentou o menor valor (0,43).

Tabela 2. Classificação das amostras segundo o Sistema Unificado

Amostra	d_{10}	CU	Cc	Classificação
1	0,16	5,55	0,43	SP - Areia mal graduada (uniforme)
2	0,14	10,00	0,85	SP - Areia mal graduada (uniforme)
3	0,14	14,00	0,79	SP - Areia mal graduada (uniforme)
4	0,13	18,00	0,96	SP - Areia mal graduada (uniforme)
5	0,09	4,77	0,83	SP - Areia mal graduada (uniforme)

Todas as amostras de resíduo apresentaram diâmetros efetivos (d_{10}) menores que 0,20 mm, o que, de acordo com Sezerino (2006) as reprovavam como material filtrante para as Wcs. No entanto, todas as amostras, exceto a 5, asseguraram permeabilidades saturadas maiores que 10^{-4} m s^{-1} , valor mínimo exigido para cumprir tal função. Com relação ao coeficiente de uniformidade (CU), segundo Caputo (1996), considera-se um material filtrante com granulometria muito uniforme os materiais cujo CU são < 5 unidades; uniformidade média para CU entre 5 e 15 unidades; e desuniforme para um CU > 15 unidades. As amostras de 1 a 3 possuem uniformidade média, a amostra 4 é desuniforme e a amostra 5 muito uniforme. No entanto, a amostra 5, a mais uniforme, foi a que apresentou menor valor de permeabilidade saturada inferior a 10^{-4} m s^{-1} , mínimo exigido para material filtrante nas WCs, enquanto a amostra 4, desuniforme, assegurou uma permeabilidade saturada satisfatória.

Segundo o Sistema Unificado de Classificação, um material de solo não-coesivo só é considerado bem graduado/desuniforme quando combina CU $> 6,0$ e coeficiente de curvatura (Cc) entre 1,0 e 3,0. Como nenhum resíduo atendeu a esta dupla condição, todos foram classificados como areias mal graduadas (SP)/ uniformes, sugerindo tratar-se de materiais com boas propriedades hidráulica exceto a amostra 5, que, mesmo sendo uniforme, não atendeu as condições de permeabilidade saturada mínima de 10^{-4} m s^{-1} (Tabela 3) para materiais filtrantes em Wcs.

Permeabilidade Saturada

Na Tabela 3 estão os resultados de permeabilidade saturada obtidos por meio dos métodos de Hazen, Kozeny-Carman e permeâmetro de carga constante. Independentemente do método utilizado, as amostras de 1 a 4 apresentaram permeabilidades saturadas maiores que $1.10^{-4} \text{ m s}^{-1}$. Este valor ($k \geq 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$) é considerado como condição necessária para que o resíduo ou solo natural não-coesivo possa ser empregado como substrato nas WCs. A amostra 5 foi a única que obteve um valor menor que $1.10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ para o método do permeâmetro de carga constante, apresentando um $k = 3,95.10^{-5} \text{ m s}^{-1}$.

Tabela 3. Permeabilidades saturadas obtidas para os resíduos pelos métodos de Hazen, Kozeny-Carman e permeâmetro de carga constante

Amostra	Hazen (m s^{-1})	Kozeny-Carman (m s^{-1})	Permeâmetro (m s^{-1})
1	$2,85.10^{-4}$	$6,29.10^{-4}$	$1,36.10^{-4}$
2	$1,80.10^{-4}$	$2,55.10^{-4}$	$4,17.10^{-4}$
3	$1,85.10^{-4}$	$4,11.10^{-4}$	$2,32.10^{-4}$
4	$1,65.10^{-4}$	$1,30.10^{-4}$	$8,26.10^{-4}$
5	$8,15.10^{-3}$	$2,77.10^{-4}$	$3,95.10^{-5}$

Sezerino (2006) descreve que a areia por ser o material mais utilizado como meio filtrante/substrato em WCs, são muitas vezes utilizados como referência, quanto a sua granulometria e índices físicos (d_{10} , CU, Cc e índice de vazios), para os cálculos de condutividade hidráulica saturada teórica. Entretanto, a forma mais apropriada para a obtenção da condutividade hidráulica saturada é submeter o material desejado, neste caso os resíduos de mineração, a ensaios em laboratório (Philippi e Sezerino, 2004). De fato, a medida direta de permeabilidade saturada com permeâmetro de carga constante parece ser a mais confiável, uma vez que a permeabilidade dos resíduos é mensurada diretamente com água, fluido utilizado nos sistemas de WCs, enquanto as permeabilidades determinadas pela equação de Hazen (empírica) e pela equação de Kozeny-Carman (base física) são baseadas na percolação de ar, que tem viscosidade diferente da água, em meios não-coesivos. Na amostra 5 pode-se perceber esta diferença de uma ordem de magnitude entre os valores obtidos pelas equações de Hazen e Kozeny-Carman e pelo permeâmetro, correspondendo aos valores de $8,15.10^{-3}$, $2,77.10^{-4}$ e $3,95.10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, respectivamente.

Composição Mineralógica

Na Tabela 4 observa-se que o mineral mais expressivo em termos percentuais em todas as amostras é o quartzo (SiO_2), variando de 27 a 44,5% entre as amostras de 1 a 4 e chegando a 81,4% na amostra 5. Na amostra 1 foi identificado o mineral muscovita - $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH},\text{F})_2$ apresentando um percentual de 23,2%. Nas amostras de 1 a 4, outros dois minerais que apresenta um percentual representativo variando de 13,6 a 18,2% e de 1,3 a 2,6% é o microclina e ortoclásio, polimorfos - KAlSi_3O_8 (polimorfos). Por fim, o mineral albita - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ também apresenta percentuais significativos (26,5 a 37,6%) nas amostras de 2 a 4.

De acordo com Sezerino (2006) materiais filtrantes como a areia, ou seja, quartzo, possuem um ótimo potencial de fluxo, sendo o meio filtrante mais utilizado atualmente nos sistemas de WCs, entretanto, nenhuma, ou muito pouca capacidade adsorviva para algumas espécies que compõem os efluentes como os nutrientes. Sendo assim, outros minerais como a dolomita - $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ e a calcita - CaCO_3 que aparece em quantidades menores nos resíduos (0,4 a 1,6 e de 0,2 a 2,3 mg kg^{-1} , respectivamente), além dos filossilicatos 2:1 biotita, muscovita e montmorilonita (1,9 a 6,4 ; 2,5 a 23,2 e 0,2 a 2,1 mg kg^{-1} , respectivamente) e o filossilicato 2:2 chamosita (0,1 a 0,6 mg kg^{-1}) podem exercer um papel importante na adsorção de nutrientes como o PO_4 , no caso de minerais a base de carbonatos (calcita e dolomita) e de NH_4^+ na superfície de troca de minerais filossilicáticos.

Tabela 4. Percentuais das fases minerais identificadas nos resíduos de mineração

Mineral (%)	Amostra				
	1	2	3	4	5
Albita	2,2	35,6	26,5	37,6	-
Biotita	1,9	6,1	9,3	2,0	6,4
Calcita	0,5	0,2	1,7	0,9	2,3
Chamosita	0,6	-	-	-	0,1
Dolomita	0,4	1,6	1,1	1,2	0,8
Hornblenda	-	-	6,6	-	-
Magnetita	0,6	1,5	0,8	1,4	0,3
Microclina	17,7	14,5	13,6	18,2	-
Montmorilonita	2,1	-	-	-	0,2
Muscovita	23,2	5,4	8,8	2,5	3,8
Ortoclássio	2,2	1,5	2,6	1,3	2,6
Quartzo	44,5	33,5	27,0	34,5	81,4
Talco	-	-	2,0	-	2,1
Zircão	4,2	0,1	-	0,4	-

Composição Elementar

Na Tabela 5 encontra-se a composição elementar das amostras de resíduos separados por elementos tóxicos, macro e micronutrientes. Partindo do pressuposto que parte dos elementos que compõem os resíduos podem se solubilizar em determinadas condições e serem incorporadas nos efluentes submetidos ao tratamento por WCs, pode-se observar que as amostras 1 e 5 apresentam concentrações que devem ser levadas em consideração, principalmente em relação aos elementos Hg, Pb e Al. Já as amostras de 2 a 4, o elemento a ser levado em consideração é o Al. Em relação aos macronutrientes e micronutrientes, chama a atenção a concentração de alguns elementos como Mg (14300 mg kg^{-1}) na amostra 5, de S na amostra 1 (>50000 mg kg^{-1}), de Cu nas amostras 1 e 5 (3721,5 e >10000 mg kg^{-1} , respectivamente), e Fe na amostra 1.

Além do meio filtrante, outro elemento atuante nos sistemas de WCs são as macrófitas, que dentre suas funções pode-se destacar a remoção de nutrientes contidos no efluente e de espécies químicas que podem interagir nos interstícios das partículas que compõem o leito filtrante através de vários mecanismos que podem envolver a solubilização, adsorção, complexação ou precipitação. Estes mecanismos dependem de vários fatores como o produto de solubilidade de algumas substâncias que podem ser formadas entre os elementos constituintes do material filtrante e outros que estão contidos no efluente, do pH do meio, da temperatura e até mesmo de reações bioquímicas desempenhadas por microrganismos.

De acordo com Esteves (1998) estudos sobre a variação mensal ou sazonal da composição química de macrófitas têm mostrado que a concentração de macro e micronutrientes estocados, metabolizados, translocados ou mesmo excretados por estas sofrem variações constantemente e estão associadas à disponibilidade de nutrientes do meio e a fatores climáticos.

Tabela 5. Composição elementar dos resíduos de mineração

Elemento (mg kg ⁻¹)		Amostra				
		1	2	3	4	5
Hg	Tóxicos	>1,0	<0,05	<0,05	<0,05	>1,0
Cd		0,08	0,03	0,02	0,02	1,04
As		17,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0
Pb		24,8	3,5	4,3	1,9	17,4
Al		6000	10600	10300	2900	9500
Na		0,03	0,05	0,04	0,07	<0,01
P	Macronutrientes	215	820	670	123	190
K		2600	8500	5800	2000	5900
Ca		6400	3500	2800	1300	7600
Mg		5400	5800	4000	1200	14300
S		>50000	200	281	<100	9200
B	Micronutrientes	<10	<10	<10	<10	<10
Cu		3721,5	11,7	11	4	>10000
Fe		120000	23600	22000	7700	18100
Mn		269	501	402	568	399
Mo		6,01	0,7	0,76	0,27	1,35
Zn		24	56	44	41	32

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos no presente estudo é possível concluir que parâmetros de distribuição granulométrica, como os coeficientes de uniformidade e de curvatura, podem auxiliar no ajuste do tamanho dos grão/partículas do meio filtrante/substrato devem ser utilizados com cautela na estimativa das permeabilidades saturadas, especialmente se há participação significativa de areia fina. Nestes casos, deve-se sempre optar por ensaios diretos de permeabilidade saturada, como o do permeâmetro de carga constante para determinação da condutividade hidráulica saturada (ks). A incorporação total ou parcial de resíduos de mineração como meio filtrante/substrato para WCs pode ser uma alternativa a areia, uma vez que alguns resíduos podem apresentar percentuais interessantes de minerais como os filossilicatos que possuem algumas propriedades de troca catiônica e adsorção com algumas espécies contidas em efluentes. Alguns macro e micronutrientes contidos nos resíduos podem também favorecer o crescimento e absorção de nutrientes contidos no efluente através de diferentes mecanismos, porém deve-se ter cuidado com possíveis elementos tóxicos que podem afetar de maneira negativa não só as macrófitas, mas também a qualidade do efluente final.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANN, Y.; REDDY, K.R.; DELFINO, J.J. Influence of chemical amendments on phosphorus immobilization in soils from a constructed wetland. *Ecological Engineering*, v. 14, p. 157–167, 1999.
- ARIAS, C.A.; DEL BUBBA, M.; BRIX, H. Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds. *Water Resource*, v. 35, p. 1159–1168, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 13292: Solo: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6457. Amostras de Solo - Preparação para ensaio de compactação e ensaio de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7181. Solo - Granulometria. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6458. Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 16840. Índice de vazios máximo de solos são-coesivos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
8. BARDET, J.P. Experimental soil mechanics. Upper Saddle River/NJ: Prentice Hall, 1997.
9. BRUCH, I.; FRITSCH, J.; BÄNNINGER, D.; ALEWELLA, U.; SENDELOV, M.; HÜRLIMANN, H.; HASSELBACH, R.; ALEWELL, C. Improving the treatment efficiency of constructed wetlands with zeolite-containing filter sands. *Bioresource Technology*, v. 102, p. 937–941, 2011.
10. CAPUTO, H.P. Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Fundamentos, v. 1. 6. ed., Rio de Janeiro: LTC, 1996.
11. CARRIER, W.D. Goodbye Hazen. Hello, Kozeny-Carman. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 129, n. 11, p. 1054– 1056, 2003.
12. ESTEVES, F.A. Fundamentos de Limnologia. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
13. HORNBERGER, G. M.; RAFFENSPERGER, J. P.; WIBERG, P.L.; ESHLEMAN, K. *Elements of Physical Hydrology*. Baltimore: Johns Hopkins, 1998.
14. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas – Relatório de Pesquisa. Brasília: IPEA, 2012.
15. LI, C.J.; WAN, M.H.; DONG, Y.; MEN, Z.Y.; LIN, Y.; WU DE, Y.; KONG, H.N. Treating surface water with low nutrients concentration by mixed substrates constructed wetlands. *Journal of Environmental Science and Health A*, v. 46, p. 771–776, 2011.
16. MATEUS, D.M.R.; VAZ, M.M.N.; PINHO, H.J.O. Fragmented limestone wastes as a constructed wetland substrate for phosphorus removal. *Ecological Engineering*, v. 41, p. 65–69, 2012.
17. OUTLOOK GLOBALFERT. Outlook Globalfert 2021: 2º Reporte Anual do Mercado de Fertilizantes 2021. Disponível em: <https://www.globalfert.com.br/OGFposEvento/arquivo/Outlook-GlobalFert-2021.pdf> Acesso em 17/08/2022.
18. PHILIPPI, L.S.; SEZERINO, P.H. Aplicação de sistemas tipo wetlands no tratamento de águas residuárias: utilização de filtros plantados com macrófitas. Ed. do Autor. Florianópolis/SC: 2004.
19. PROCHASKA, C.A.; ZOUBOULIS, A.I. Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate. *Ecological Engineering*, v. 26, p. 293–303, 2006.
20. SEZERINO, P.H. Potencialidade dos Filtros Plantados com Macrófitas (Constructed Wetlands) no Pós-Tratamento de Lagoas de Estabilização sob Condições e Clima Subtropical. 2006. 171f. Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
21. TAO, W.; WANG, J. Effects of vegetation, limestone and aeration on nitrification, anammox and denitrification in wetland treatment systems. *Ecological Engineering*, v. 35, p. 836–842, 2009.
22. XU, D.; XU, J.; WU, J.; MUHAMMAD, A. Studies on the phosphorus sorption capacity of substrates used in constructed wetland systems. *Chemosphere*, v. 63, p. 344–352, 2006.