

## **AValiação DO POTENCIAL DO USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NA PRODUÇÃO DE SOLOS PARA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS POR MINERAÇÃO**

**Rogério Pires Santos**<sup>(1)</sup>

Professor no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense - IFSUL, Campus Camaquã-RS. Esp. Gestão Pública- UFRGS. Mestre em Engenharia e Ciências Ambientais-UCS. Doutorando em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais-UFRGS <sup>(1)</sup>

**Rejane Tubino**<sup>(2)</sup>

Professora Titular PPG3M-UFRGS. Engenheira Civil. Doutora em Metalurgia-UFRGS<sup>(2)</sup>

**Ivanete Bueno Cardoso Santos**<sup>(3)</sup>

Tecnóloga em Gestão Ambiental-ULBRA<sup>(3)</sup>

**Endereço**<sup>(1)</sup>: Rua Ana Gonçalves da Silva, 901 , Bairro Olaria, Camaquã-RS –Brasil – CEP: 96785-130 – Tel.: +55 54 984441081 - e-mail: rogerio.santos@camaqua.ifsul.edu.br

### **RESUMO**

A evolução da civilização moderna traz consigo uma série de desafios quanto à gestão de seus resíduos. A destinação adequada de resíduos de construção e demolição (RCD) tem se tornado um desafio em todo o planeta. Paralelo a este desafio, surge outro, o de recuperar áreas degradadas por mineração. O objetivo do presente trabalho foi caracterizar através de Fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX) amostras de RCD coletados durante período de outubro de 2018 a outubro 2019 em uma central de reciclagem e determinar seu potencial como elemento na produção de solos em áreas degradadas por mineração. Foram encontrados calcita e quartzo. Além de elementos traço como Fe, Mg, Mn, Cu, Zn, Ni, elementos essenciais para a nutrição vegetal, capazes de restaurar as condições químicas e físicas dos solos. Os resultados obtidos demonstraram que elementos Cromo (Cr) e Bário (Ba) encontraram-se acima dos limites da Resolução CONAMA 420/2009 (Brasil), enquanto que de acordo com a Orden AAA/661/2013 (Espanha), todos elementos encontraram-se acima dos limites permitidos para aquele país. A presença de metais pesados é considerada normal em solos brasileiros, sendo alguns considerados nutrientes essenciais. Os resultados fornecem dados para afirmar que os RCD são passíveis de utilização em produção de solos para fins de recuperação de áreas degradadas por mineração, mediante aplicação de testes em maior escala e com interface solo-àgua-planta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Recuperação de solos, áreas degradadas, resíduos de construção.

### **INTRODUÇÃO**

A Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei Federal nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010) estabelece a hierarquia apropriada na gestão integrada de resíduos sólidos: a não geração, reuso, reciclagem, tratamento e destinação final adequada. Na mesma lógica, a Resolução 307/2002 (BRASIL, 2002) do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) estabelece diretrizes, critérios de classificação e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil no país.

No Brasil, são geradas anualmente 7.192.372,71 toneladas pelo setor público e 7.365.566,51 toneladas pelo setor privado (IPEA, 2012) de resíduos de construção civil, os quais se não geridos de forma correta, podem causar inúmeros impactos ambientais negativos.

Em países mais desenvolvidos os RCD também geram problemas, dificultando a gestão e destinação final, dados os passivos ambientais associados (CALVO,2017; SUÁREZ-SILGADO et al, 2018; MENEGAKI & DAMIGOS, 2018). A exemplo da Espanha, que em 2012 gerou 26 milhões de toneladas de RCD, considerando que estes representaram 20% do total dos resíduos gerados por aquele país, sendo a sexta colocada no ranking de geradores da União Europeia (FERNANDEZ-NARANJO et al, 2016).

No Brasil, a geração de RCD chega ao montante de 50% do total dos resíduos gerados nos grandes centros urbanos (LASSO,2011).

Assim, existe a necessidade da busca de soluções técnicas e viáveis, do ponto de vista econômico e ambiental, para gestão integrada adequada de resíduos da construção civil, com mínimo impacto ambiental possível. No Brasil os geradores são legalmente responsáveis pelo correto manejo e gestão.

Em paralelo, em outra cadeia produtiva, a de mineração, há necessidade de recuperação de áreas degradadas, em especial a céu aberto, a exemplo das minerações de argila para cerâmica e de extração de carvão mineral. Ocorre que há necessidade de considerar-se que a utilização de solos produzidos, na recuperação de áreas degradadas, favorece a conservação ambiental pela redução da utilização de áreas de empréstimo associado à reciclagem de RCD, reduzindo os impactos ambientais negativos da disposição destes em aterros.

Ressalta-se que embora os RCD classificados como “classe A” pelo CONAMA sejam considerados como resíduos inertes, Oliveira (2002) concluiu que resíduos de concreto apresentaram-se como “não inertes”, quando submetidos a águas de chuva ácida. O autor concluiu que íons provenientes da decomposição desses resíduos podem contribuir para a contaminação de cursos d’água, alterando suas condições naturais.

No mesmo sentido, diversos pesquisadores alertam que na disposição ou utilização de RCD em solo, há necessidade prévia de estudo e análise do potencial tóxico desses resíduos, pois na caracterização desses, os autores encontraram elementos tóxicos (SCHAEFER et al, 2007; TOWNSEND et al, 2004; RAMALHO & PIRES, 2009; FILIZOLA et al, 2006, FERNADEZ-NARANJO et al, 2016) sendo desta forma necessário testar a toxicidade dos resíduos por meio de técnicas físico-químicas e a partir da utilização de bioindicadores.

Em nível internacional, os RCD também representam problema para a gestão integrada de resíduos, representando elevados volumes, problema agravado em países em que a extensão territorial reduzida, e conseqüentemente, a produção de recursos naturais, agrava a necessidade de reaproveitamento e reciclagem dos mesmos.

A geração de RCD na União Europeia (EU) apresenta diferenças significativas entre seus Estados membros. O total de resíduos gerados para ano de 2014 foi de 2,5 milhões de toneladas, sendo que o percentual de RCD foi elevado (Luxemburgo: 85%, Malta:75%, Holanda, Alemanha, Dinamarca e Reino Unido: 68, 53, e 48% respectivamente), sendo que a taxa de reciclagem destes resíduos em 2014 foi de 88%, considerando 28 países da EU. No restante dos países do continente europeu foi de 12%, destinando-se os RCD a aterros (SÚAREZ-SILGADO et al, 2018).

Segundo Suárez-Silgado et al (2018), os países mais desenvolvidos apresentaram uma taxa de reciclagem de RCD muito alta: Malta (100%), Holanda (99%), Alemanha (94%), Dinamarca (92%), Reino Unido (95%). Houve uma elevação em comparação a 2012, comprovando uma tendência de melhoria na gestão de RCD na Europa.

Nos Estados Unidos (EUA) 600 milhões de toneladas de RCD foram gerados em 2018, mais do que o dobro da quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados. A demolição representa mais de 90% da geração total de RCD nos EUA, enquanto a construção civil representa menos de 10%. Aproximadamente 455 milhões de toneladas de RCD foram direcionados para reciclagem e 145 milhões de toneladas foram enviadas para aterros (EPA, 2021).

Na Ásia, existe uma variação muito grande entre países. A exceção de Coreia do Sul e Japão, nos demais países do continente, a gestão de RCD é deficiente, sendo que em torno de 40% dos resíduos totais gerados são RCD e praticamente sem reciclagem (SÚAREZ-SILGADO et al, 2018).

A geração de RCD é muito variável entre países, o que pode ser explicado pela variação temporal, quando as condições econômicas são mais favoráveis à construção civil, em função do clima, além do grau de incentivo à construção civil.

Na América Latina persistem ainda inúmeras dificuldades, por fatores econômicos, sociais e culturais, embora o Brasil seja o primeiro país a adotar uma legislação de gestão de RCD (SUAREZ-SILGADO et al, 2018).

No Equador, a proteção ambiental está prevista na Constituição de 2008, sendo assim recente, e especificamente a gestão de resíduos está prevista na Lei de Gestão Ambiental, promulgada em 2012 (VEINTIMILLA, 2017).

Na Costa Rica, a Lei n. 8.839/2010 (Gestão Integrada de Resíduos) foi criada em 2010 (CALVO,2017). A gestão integrada de resíduos na Costa Rica propõe um modelo semelhante ao brasileiro, privilegiando a não geração e culminando com o reuso e reciclagem, para posteriormente dispor de maneira adequada os rejeitos (CALVO, 2017).

Colômbia apresenta diferentes legislações municipais para gestão integrada de RCD, destacando-se as cidades de Medellín, Bogotá, Cali e Ibagué (SUÁREZ-SILGADO et al, 2018).

Na tentativa de melhorar a relação entre geração e destinação adequada, na Europa, especificamente na Holanda, desde 1997 há aplicação de restrições e proibições sobre aterros de RCD, bem como em Flandres, desde 1998. Na Alemanha os RCD não podem ser enviados a aterros e na Áustria há obrigação de separar e reciclar RCD desde 1993. Na Suécia há proibição de aterro de resíduos perigosos e combustíveis desde 2002 e resíduos sólidos desde 2005, incluindo os RCD (SUÁREZ-SILGADO et al, 2018).

Segundo Suárez-Silgado et al, (2018) em alguns países há a imposição de impostos para o descarte de RCD, a exemplo de Hong Kong, que desde 2005 cobra impostos pela disposição. Na França, Dinamarca, Holanda, Suécia, Finlândia, Bélgica, Áustria, Itália e França também há cobrança de impostos para disposição de RCD como medida de restrição à disposição em detrimento da reciclagem, em uma tentativa de desestimular a geração e descarte dos resíduos, priorizando a recuperação de materiais. Os autores ainda destacam países como Dinamarca e Grã Bretanha onde foram promulgados planos de impostos sobre recursos naturais com fins de diminuir a diferença de custo entre reciclar e extrair matéria prima da natureza. Segundo os autores, a concessão de benefícios e subsídios também podem recompensar as atividades de reciclagem, sendo adotada em alguns países como Holanda.

Apesar dos avanços em termos de legislação, o uso de RCD na recuperação de áreas degradadas é pouco relatado na literatura especializada.

Lasso (2011) desenvolveu experimento envolvendo RCD “Classe A” como corretivo e condicionador de solo para fins agrícolas com bons resultados. Fernandez-Naranjo et al. (2016) avaliaram a utilização futura de RCD na Espanha na recuperação de áreas degradadas por mineração de acordo com normas da União Europeia, em função de uma nova diretriz daquela nação para destinação destes resíduos em áreas de mineração, encontrando viabilidade técnica e ambiental, ressaltando apenas o elevado teor de sulfatos no RCD daquele país, recomendando a adoção de técnicas de impermeabilização geotécnica com fins de evitar a percolação. Restrepo, Bedoya & Vega (2015) caracterizaram e avaliaram o RCD como opção de recuperação de solos urbanos na Colômbia, concluindo pela viabilidade técnica e ambiental mediante aprofundamento das técnicas de caracterização e reciclagem destes resíduos. Restrepo, Bedoya & Vega (2015) testaram a utilização de RCD na Colômbia com fins de recuperação de solos degradados, concluindo pela sua viabilidade como condicionador de solos.

Porém, todos os especialistas, reafirmam a necessidade de aprofundamento nas questões ambientais, especialmente no potencial de contaminação proporcionado pelo RCD, dado a sua grande heterogeneidade e composição, a fim de evitar risco de bioacumulação nos ecossistemas associados. Devido a grande variação na geração e a heterogeneidade de resíduos que compõe o RCD, existe a preocupação com a concentração de possíveis contaminantes (SCHAEFER et al, 2007; TOWNSEND et al, 2004; RAMALHO & PIRES, 2009; FILIZOLA et al, 2006, FERNADEZ-NARANJO et al, 2016).

Townsend et al (2004) relataram alto nível de metais pesados em RCD. No mesmo sentido Ramalho & Pires (2009) identificaram elementos perigosos em RCD reciclados em São Carlos, SP. Ainda, segundo Schaefer et al (2007), metais pesados lixiviaram de RCD composto por argamassas, sendo Cu, Zn e Cd encontrados em maior concentração, sendo os valores encontrados superiores ao recomendado pela diretiva europeia 98/83/EC.

Assim, o objetivo do presente trabalho é efetuar a caracterização química prévia por meio de Difração de raios-X (DRX) e Fluorescência de raios-X (FRX) de amostras de RCD, “classe A”, segundo Resolução CONAMA 307/2002, com fins de verificação de elementos químicos com potencial de contaminação e bioacumulação, visando a viabilidade ambiental da utilização na produção de solos em projetos de recuperação de áreas degradadas por mineração.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução do presente trabalho foram caracterizados química e mineralogicamente por FRX e DRX os resíduos de construção civil e demolição “classe A” coletados em uma central de reciclagem de RCD no período de 12 meses (outubro de 2018 a outubro de 2019) a fim de proporcionar uma amostragem mais representativa em um espaço temporal, com fins de avaliar seu uso potencial na recuperação de solos degradados por mineração.

### COLETA E AMOSTRAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Foram coletadas três amostras de 20 kg de resíduos sólidos de construção civil, de acordo com norma NBR 10.007/2004 (ABNT, 2004), na central de reciclagem de resíduos de construção e demolição 3R'S Reciclagem, em Criciúma, SC, Brasil (Figura 1), município de 215.186 habitantes (IBGE, 2020), polo industrial e mineral do Estado de Santa Catarina (SC), na região Sul do Brasil, durante o período de um ano (a cada quatro meses), com finalidade de obter uma amostra final com maior representatividade no período amostrado. Ressalta-se que a usina de reciclagem opera produzindo RCD reciclado a partir de resíduos “classe A”, segundo Resolução CONAMA 307/2002, de forma mista, isto é, material chamado “cinza” (constituído de concreto e argamassa) e material chamado “vermelho” (cerâmica, blocos cerâmicos, tijolos), o que se traduz em maior vantagem no presente trabalho, pois os dois resíduos resultam em único produto já homogeneizado.

Após coleta, secagem em estufa a 100°C durante 24 horas, as amostras foram quarteadas (separados 30 g), após processadas em moinho orbital, tamisadas em peneira de 200 *mesh* e enviadas, após novo quarteamento (5 g), para o Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), para definição dos minerais na forma de óxidos, através das técnicas de difração de raios-X (DRX) e caracterização mineralógica por meio de fluorescência de raios-X (FRX), sendo o restante reservado para a execução da pesquisa.



**Figura1: Detalhe do processo produtivo na usina de reciclagem de resíduos de construção civil 3R'S Reciclagem em Criciúma, SC, Brasil**

Através de técnicas de difração de raios-X (DRX) e fluorescência de raios-X (FRX). Foi determinada a presença e quantidade de minerais. Estes minerais ao serem aplicados aos solos degradados podem melhorar as propriedades físicas desses (aeração, infiltração) e fornecer nutrientes essenciais (Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Ni) ou benéficos para as plantas: Na, Si, Cu (RESTREPO; BEDOYA & VEGA, 2015).

## **ANÁLISE DE DRX**

Para a caracterização química por meio de análise por difração de raios-X (DRX) foi utilizado o método do pó. Na amostra em pó o material pulverizado ou desagregado é depositado em um porta amostra específico para pó procurando-se preservar a desorientação das partículas onde todos os minerais ou estruturas cristalinas são analisados.

Os minerais e/ou fases cristalinas foram identificados através da medida das distâncias interplanares (valores de “*d*”) e das intensidades relativas dos picos nos difratogramas.

A DRX foi realizada em um difratômetro de raios-X marca Siemens (BRUKER AXS), modelo D-5000 ( $\theta$ - $2\theta$ ) equipado com tubo de ânodo fixo de Cu ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ), operando a 40 kV e 25 mA no feixe primário e monocromador curvado de grafite no feixe secundário.

## **ANÁLISE DE FRX**

Na Fluorescência de Raios-X (FRX) as amostras em pó foram analisadas no intervalo angular de 15 a 75° 2 $\theta$  em passo de 0.05°/1s utilizando-se fendas de divergência e anti-espalhamento de 2 mm e 0.2 mm no detector.

Para os elementos maiores o preparo da amostra foi realizado através da técnica em amostra fundida; já os elementos menores, o preparo da amostra se deu pelo método da pastilha prensada. A presença de voláteis foi avaliada através de técnicas gravimétricas e está representada por LOI (*Loss On Ignition*). O espectrômetro de fluorescência de raios-X (FRX) utilizado foi o modelo RIX 2000 da marca Rigaku.

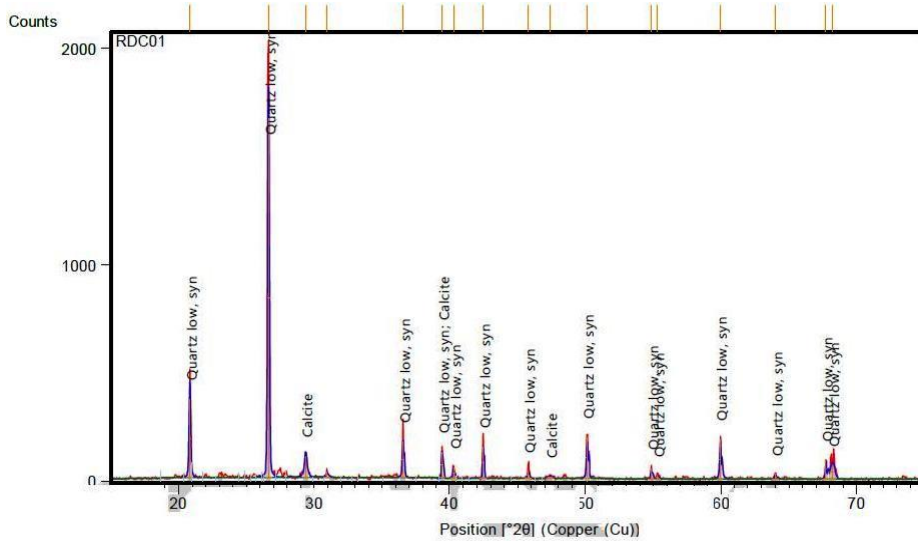
## **TRATAMENTO DOS DADOS**

O tratamento estatístico dos dados foi realizado através da ferramenta Solver do Microsoft Excel<sup>®</sup>, consistindo em cálculo das médias, desvio-padrão (DP) e coeficiente de variação (CV).

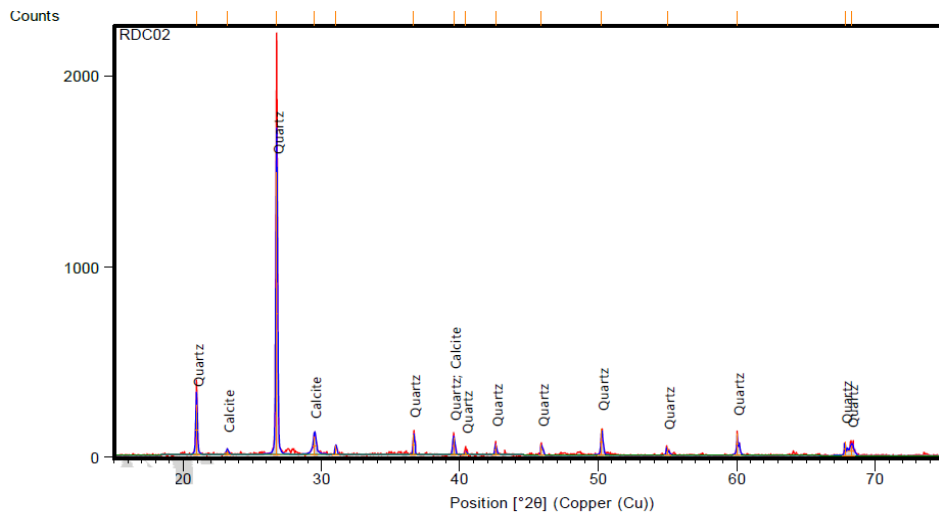
## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A caracterização química de RCD permite avaliar o potencial destes resíduos, devidamente reciclados após segregação, e recuperação de áreas degradadas por mineração, em especial nos processos de mineração a céu aberto, evitando assim possíveis gerações de novos sítios contaminados e solos degradados.

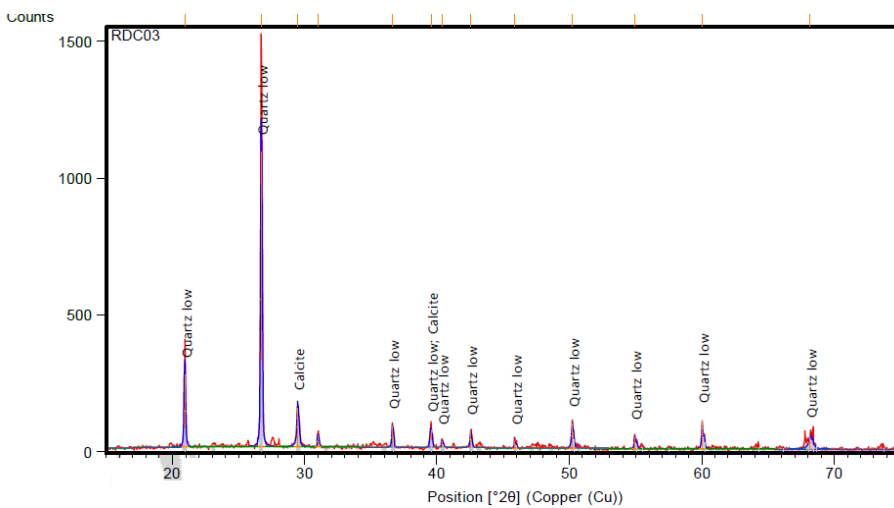
A análise de DRX visou corroborar as fases cristalinas presentes no RCD. Nas Figuras 2, 3 e 4 pode-se visualizar as fases cristalinas bastante similares, constituídas por quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), presentes nas amostras coletadas durante o período de doze meses, em central de reciclagem de RCD no município de Criciúma, SC, corroborando a origem destes materiais constituídos basicamente por concreto, argamassa e cerâmica, em sua maior composição, conforme esperado para este tipo de resíduo, apresentando picos de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e  $\text{CaCO}_3$ , estando ausentes os silicatos de Al e Fe, o que justifica-se, no caso do quartzo, pelo fato de todo o  $\text{SiO}_2$  estar ligado ao quartzo, corroborando estes resultados com o descrito por Lasso (2011); Restrepo, Bedoya e Vega (2015).



**Figura 2: Diafratograma de raios-X da amostra 1 de RCD**



**Figura 3: Diafratograma de raios-X da amostra 2 de RCD**



**Figura 4: Diafratograma de raios-X da amostra 3 de RCD**

Na Tabela 1 estão presentes os resultados da FRX os quais estão de acordo com os resultados da avaliação de DRX, onde os valores estão apresentados em porcentagem (%) de peso da amostra; na Tabela 2, são apresentados os elementos traço, os valores são apresentados em mg.Kg<sup>-1</sup>.

**Tabela 1: Espectrometria de fluorescência de raios-X: resultado em % em peso**

Elemento	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
Amostra / S <sup>1</sup>	0,09	0,04	0	0,03	0	0,02	0,01	0,07	0,02	0,01	-
RCD 1	64,88	8,72	0,65	3,74	0,05	1,7	9,86	nd	1,4	0,06	8,94
RCD 2	48,59	10,97	0,87	4,35	0,06	3,29	16,23	nd	1,28	0,08	14,28
RCD 3	52,43	10,91	0,84	4,28	0,06	2,56	14,7	nd	1,36	0,09	12,79
Média	55,3	10,2	0,78	4,12	0,05	2,51	13,59	nd	1,34	0,07	12,0
DP	8,52	1,28	0,12	0,33	0,006	0,79	3,25	-	0,06	0,02	2,75
CV	15,41	12,55	15,19	8	10	31,35	23,9	-	4,45	25,97	22,9

LOI: perda por ignição (*Loss on ignition*); DP: desvio-padrão; CV: Coeficiente de variação; S<sup>1</sup>: Desvio-padrão da metodologia para o Padrão de Granito AC-E tabelado pelo Geostandards; nd: Não detectado

**Tabela 2: Espectrometria de fluorescência de raios-X: resultado de elementos traço em mg.Kg<sup>-1</sup>**

Elemento	S <sup>1</sup>	Limite mg.Kg <sup>-1</sup> de peso seco: Orden AAA/661/2013 *	Limite mg.Kg <sup>-1</sup> de peso seco: Resolução CONAMA 420/2009**	RCD1	RCD2	RCD3	Média	DP	CV
Y	0,78	n/c	n/c	9,7	15,7	15,8	13,7	3,4	25,4
Pb	1,56	0,5	72	50,5	37,0	41,2	42,9	6,9	16,0
Ni	1,45	0,4	30	22,3	19,5	18,7	20,1	1,8	9,37
Cu	0	2	60	32,7	24,7	20,2	25,8	6,3	24,47
Sr	0,87	n/c	n/c	243,6	325,3	331,1	300	48,9	16,3
Zr	0,68	n/c	n/c	239,3	144,6	247,8	210,5	57,2	27,21
Zn	0,65	4	300	121,1	114,7	121,1	118,9	3,69	3,10
Nb	0,3	n/c	n/c	5,9	5,8	5,6	6,1	0,43	7,13
Rb	1,11	n/c	n/c	73,8	71,4	72,8	72,6	1,2	1,65
Cr	4,62	0,5	75	244,1	141	145,7	176,9	58,2	32,9
Ba	29,63	20	150	225,6	196,1	186,3	202,6	20,4	10,09

S<sup>1</sup>: Desvio Padrão da metodologia para o Padrão de Granito JG1A tabelado pelo Geostandards; DP: Desvio-padrão; CV: Coeficiente de variação; nc: não consta; \*Referência para aterros de resíduos inertes; \*\*Referência de prevenção da qualidade de solos.

Quanto aos elementos traço, ou elementos menores, pode-se constatar que estes estão presentes de forma natural nos solos brasileiros em diferentes proporções, dependendo da rocha de origem, sendo estas variações atribuídas às propriedades químicas e físicas de cada perfil de solo (HUGEN et al., 2013). Ainda, observa-se na Tabela 2, que se encontram abaixo dos valores determinados pela Resolução CONAMA 420/2009, que determina o Valor de Referência para Qualidade do Solo (VRQ) no Brasil, com exceção dos elementos cromo e bário.

Os elementos cromo e bário são largamente utilizados na produção de materiais de construção civil, como cimento e cerâmica, sendo o bário utilizado na composição de cerâmicas e o cromo na produção de cimento, ao qual ao passar por processo de manufatura pode oxidar o cromo à sua forma mais tóxica, o Cr(VI), este limitado na EU, desde 2005 a 2 mg. Kg<sup>-1</sup> de Cr (VI) solúvel. No Brasil os teores de Cr (VI) e Cr (III) em cimentos e

derivados estão acima dos limites permitidos pela normativa europeia, tornando-se inclusive um impeditivo para exportação destes produtos (MATOS & NÓBREGA, 2009).

O bário em condições elevadas em solos pode ser absorvido por plantas e inibir a atividade fotossintética afetando o desenvolvimento das plantas e conseqüentemente a produtividade, evidenciando o efeito tóxico deste elemento químico (LIMA et al, 2012).

Ressalta-se, porém, que quanto a normativa europeia Orden AAA/661/2013 (ESPANHA, 2013), todos os elementos traço encontram-se acima do limite permitido pela normativa (Tabela 2), corroborando os resultados obtidos por Schaefer et al (2007).

Os metais pesados são elementos químicos relativamente estáveis, não degradáveis e com densidade maior que quatro e que apresentam elevado caráter tóxico. No solo o risco de contaminação por metais é potencializado por atividades industriais, agrícolas e de urbanização (HUGEN et al., 2013). Apresentam formas de comportamento ambiental e toxicológico altamente diferenciado de acordo com as diferentes formas químicas. Essa característica deve-se a sua estrutura atômica, a qual é caracterizada por orbitais *d* livres, reagindo com aceptores de elétrons (TAVARES, 2009).

Após serem liberados das rochas de origem pelo intemperismo, em função de possuírem eletronegatividade, raios iônicos e estados de oxidação diferentes, os metais pesados podem ser precipitados ou co-precipitados junto aos minerais secundários, adsorvidos nas superfícies dos minerais secundários (argilas ou óxidos de Fe, Al e Mn) ou da matéria orgânica presente no solo ou, ainda, complexados e lixiviados pela solução do solo (ALLEONI, et al., 2005).

Assim, considerando-se o princípio da precaução, cabe ressaltar que há necessidade de limitar a aplicação de RCD no solo, a fim de evitar acumulação de metais pesados ao longo do tempo (HUGEN et al., 2013).

Em um processo de recuperação de área degradada por mineração, pode tornar-se viável a aplicação de RCD em solos produzidos, uma vez a área recuperada, esta será destinada a uma finalidade de acordo com o processo de licenciamento ambiental, diferente de uma área agrícola, por exemplo, onde a recuperação do solo visa ao aumento da fertilidade, sendo necessário correções e aplicações de fertilizantes e condicionadores de solo com maior constância.

Pela análise de FRX, conforme Tabela 1, pode-se constatar que grande parte do material constituinte do RCD amostrado é quartzo, considerado inerte, no entanto, o mesmo possui função estruturante no solo, e pode contribuir com as propriedades físicas do mesmo, no aumento da capacidade de retenção de água, aeração, infiltração e na textura do solo (LASSO, 2011; RESTREPO, BEDOYA & VEGA, 2015).

Em um experimento, Silva & Silva (2018) utilizaram RCD para fins de formação de barreira hidráulica em mineração de carvão, com finalidade de recuperação de área degradada pela mineração e evitar a formação de drenagem ácida de minas com sucesso, na proporção de 75/25, onde a mistura apresentou resultados semelhantes ao solo natural, indicando a viabilidade prévia do uso de RCD na recuperação de áreas de gradadas por mineração de carvão.

Cabe ressaltar o percentual médio de 13,59% de Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) nas amostras analisadas, o que pode contribuir para melhoria da qualidade química do solo e elevar o pH (LASSO, et al., 2013), o que torna o material interessante na recuperação de solos com pH menos elevado. Este percentual está acima do encontrado por LASSO (2011), fato justificado pela forma de operação da central de reciclagem de RCD, fonte das amostras do presente trabalho, ao processar e produzir material misto: cinza e vermelho de forma conjunta, possuindo o material cinza maior teor de carbonatos, devido as maiores concentrações de cimento e argamassa, associado ao encontrado no RCD “vermelho”, constituído basicamente por cerâmica, blocos e tijolos, no entanto parte destes com material “cinza” aderido, principalmente argamassa.

Os RCD também são fonte de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  e micronutrientes essenciais aos organismos vegetais, assim como o alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) presente na forma de óxidos nas cerâmicas e argilas, e Ferro ( $\text{Fe}^{+2}$ ) no caso da presença de Feldspatos oriundos do material cerâmico, cimento e calcário utilizados na fabricação dos insumos e materiais de construção civil.



Destaca-se que o coeficiente de variação ficou abaixo de 20% na maior parte dos elementos analisados, o que corrobora com Lasso et al. (2013), concluindo que existe um grau de padronização na produção de materiais de construção civil, assim como no processo de produção de RCD reciclados.

Igualmente, devem-se efetuar estudos sobre a interação solo-água-plantas, a fim de verificar possíveis contaminações e bioacumulações devido à solubilidade e acidificação biológica dos materiais presentes, considerando a heterogeneidade e composição química dos resíduos de construção e demolição.

## CONCLUSÕES

Os RCD apresentam características desejáveis para a produção de solos com fins de recuperação de áreas degradadas por mineração, pois contêm elementos necessários ao bom desenvolvimento do solo, podem proporcionar melhoria em aspectos físicos e também químicos, melhorando a estrutura e textura do solo, sua capacidade de aeração e infiltração bem como resultar em melhoria na capacidade de troca de cátions (CTC), pela presença de minerais, além de elementos traço indispensáveis ao desenvolvimento dos organismos vivos vegetais.

Ainda, a presença de carbonatos pode resultar em elevação do pH contribuindo para uma recuperação mais efetiva em solos ácidos.

Desta forma, a correta utilização de RCD devidamente segregados, reciclados e após a análise amostral criteriosa de sua composição química, na recuperação de sítios degradados por mineração, pode abrir caminho para o fechamento do ciclo de resíduos de duas grandes cadeias produtivas: mineração e construção civil, favorecendo ao pleno desenvolvimento sustentável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALLEONI, L.R.F.; BORBA, R.P. & CAMARGO, O.A.. Metais pesados: da cosmogênese aos solos brasileiros. *In: Tópicos em Ciência do Solo*, Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo vol. IV, 2005.
2. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.007: Amostragem de Resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004, 21p.
3. BRASIL. *Lei Federal nº 12.305/2010* - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em 4 de julho de 2019.
4. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Resolução Conama n. 307*, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, 2002.
5. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Resolução Conama n. 420*, de 30 de dezembro de 2009. Dispõe sobre os critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Diário Oficial da União, 2009.
6. CALVO, S.M.R. Resíduos peligrosos de la construcción en Costa Rica y sus impactos al ambiente. Trabalho final de graduação: Engenharia Ambiental, Escola de Química: Instituto Tecnológico da Costa Rica, 2017, 82 fl.

7. EPA - United States Environmental Protection Agency. Sustainable management of construction and demolition material. Disponível em: <https://www.epa.gov/smm/sustainable-management-construction-and-demolition-material>. Acesso em: 02 de julho de 2021.
8. ESPANHA. *Orden AAA/661 de 18 de abril, por la que se modifican los anexos I,II y III del Real Decreto 1841/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*. Boletín Oficial Del Estado, 2013.
9. FERNÁNDEZ-NARANJO, F.J.; ALBERRUCHE, E. RODRÍGUEZ, V., et al. *Recycled construction and demolition waste in mining rehabilitation. Translation on Ecology and the Environment*, vol.202: 28-35, doi: 10.2495/WM160031, 2016.
10. FILIZOLA, H.F.; GOMES, M.A.F.; SOUZA, M.D. Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise de qualidade ambiental: solo, água e sedimentos. Embrapa Meio Ambiente, 2006.
11. HUGEN, C.; MIQUELLUTI, D.J.; CAMPOS, M.L., et al. *Teores de Cu e Zn em perfis de solos de diferentes litologias em Santa Catarina*. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.17, n.6, p.622–628, 2013.
12. IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Criciúma –SC. Disponível em: <http://www.ibge/cidades>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2020.
13. IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA APLICADA. Diagnóstico dos resíduos sólidos da construção civil. Relatório técnico, IPEA, 2012, 42 p.
14. LASSO, P.R.O. Avaliação da utilização de resíduos de construção civil e demolição reciclados (RCD-R) como corretivos de acidez e condicionadores de solo. Tese. Universidade de São Paulo: Programa de Pós Graduação em Ciências, 2011, 122 fl.
15. LASSO, P.R.O.; VAZ, C.M.P.; BERNARDI, et al. *Avaliação do uso de resíduos de construção e demolição reciclados como corretivo da acidez do solo*. R. Bras. Ci. Solo, 37:1659-1668, 2013.
16. LIMA, E.S.A.; SOBRINHO, N.M.B.A.; MAGALHÃES, M.O.L.; et al. *Absorção de bário por plantas de arroz (oryza sativa l.) e mobilidade em solo tratado com baritina sob diferentes condições de potencial redox*. Quim. Nova, Vol. 35, No. 9, 1746-1751, 2012.
17. MATOS, W.O.; NOBREGA, J.A. *Especiação de cromo em cimentos e derivados de cimento brasileiros*. Quim. Nova, Vol. 32, No. 8, 2094-209, 2009.
18. MENEGAKI, M.; DAMIGOS, D. *A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management*. Green and Sustainable Chemistry, v.13:8–15, 2018.
19. OLIVEIRA, M.J.E. Materiais descartados pelas obras de construção civil: Estudo dos resíduos de concreto para reciclagem. Tese. Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, 2002, 191 fl.
20. RAMALHO, AM; PIRES, A.M.M. Viabilidade do uso agrícola de resíduos da construção civil e da indústria cerâmica: atributos químicos. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA-CIIC, 3, Campinas, 2009. Anais... Instituto Agrônomo de Campinas. CD-ROM, 2009.
21. RESTREPO, E. M.; BEDOYA, L.O.; VEGA, N. O. *Residuos de La construcción: una opción para la recuperación de suelos*. Revista EIA, v 12, n. 2: 55-60, 2015.
22. SCHAFFER, C.O.; ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. *Estudo do comportamento de lixiviação de argamassa produzidas com agregados reciclados*. Exacta, v.5, n.2: 243-252, 2007.
23. SILVA, T.C.; SILVA, C.R. Estudo do comportamento geotécnico de misturas de solo argiloso e resíduos de construção civil para aplicação como barreira hidráulica em áreas degradadas. Universidade do Extremo

Catarinense – UNESC: Trabalho de conclusão de curso: Engenharia Civil. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/handle/1/6315>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2020.

24. SUÁREZ-SILGADO, S; MOLINA, J.D.A; MAHECHA,L; et al. *Diagnóstico y propuestas para la gestión de los residuos de construcción y demolición en la ciudad de Ibagué (Colombia)*. *Gestión y Ambiente* 21(1): 9-21,2018.
25. TAVARES, S.R.L. *Fitorremediação de solo e águas em áreas contaminadas por metais pesados proveniente da disposição de resíduos perigosos*. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009, 2009, 415 fl.
26. TOWNSEND,T.; TOLAYMAT.; LEO,K; et al. *Heavy metals in recovered fines from construction and demolition debris recycling facilities in Florid*. *Science of the Total Environment*, v.332:1-11, 2004.
27. VEINTIMILLA, J.A.R. Metodología para el control y manejo de residuos de construcción y demolición de edificaciones de la ciudad de Machala. Dissertação: Mestrado. Unidade Acadêmica de Engenharia Civil: Centro de Estudos de Pós-Graduação. Universidade de Machala, Equador,2017, 52 fl.
28. UMPHRES, M.B. *Technology evaluation of sequencing batch reactors*. *Journal Water Pollution Control Federation*, v.57, n.8, p. 867-875, 1985.
29. DATAR, M.T., BHARGAVA, D.S. *Effects of environmental factors on nitrification during aerobic digestion of activated sludge*. *Journal of the Institution of Engineering (India)*, Part EN: Environmental Engineering Division, v.68, n.2, p.29-35, 1988.
30. FADINI, P.S. Quantificação de carbono dissolvido em sistemas aquáticos, através da análise por injeção em fluxo. Campinas. Dissertação de mestrado-Faculdade de Engenharia Civil-Universidade Estadual de Campinas, 1995.