XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/79

Composição Química de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados por meio de Abordagem Semi-Quantitativa de Ensaios de Fluorescência de Raios X

Mateus Porto Fleury
Professor Substituto, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, Brasil, mateus.fleury@ufscar.br

Érica Fernanda da Silva Tirelli
Coordenadora e pesquisadora de Laboratório, Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), São Caetano do Sul, Brasil; erica.tirelli@maua.br

Eder Carlos Guedes dos Santos
Professor, Escola de Engenharia de São Carlos (EECA), Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, Brasil, edersantos@ufg.br

Jefferson Lins da Silva
Professor, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, Brasil, jefferson@sc.usp.br

RESUMO: Os resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) são conhecidos por sua significativa variabilidade decorrende dos materiais que lhe dão origem. Recentemente, uma das técnicas que ganharam evidência para avaliar a composição química dos RCD-R é o ensaio de fluorescência de Raios X (FRX). Contudo, este ensaio ainda é incipiente no cenário nacional, requisitando maiores investigações. Neste contexto, este artigo objetiva determinar a composição química de amostras de RCD-R. Distintos métodos de preparação de amostra foram avaliados para a determinação da melhor granulometria e método de preparo. Para tanto, amostras de RCD-R foram coletadas após 500 dias em diferentes condições de temperatura e ensaiadas por FRX. Quanto ao método de preparação de amostras, notou-se que os resultados mais representativos foram obtidos com amostras trituradas, peneiradas em malha de 0,60 mm e submetidas à termogravimetria antes do ensaio de FRX. As oito amostras ensaiadas segundo este processo revelaram pequena variabilidade e composição química semelhante à relatada na literatura, com predominância dos principais compostos que compõem o cimento e as partículas de solo. Assim, este estudo demonstra o potencial do FRX na caracterização química de RCD-R e evidencia a importância da preparação das amostras.

PALAVRAS-CHAVE: Composição Química, Agregados Reciclados, Preparação de Amostras, Fluorescência de Raios X.

ABSTRACT: Recycled construction and demolition waste (CDW-R) is known for its significant variability due to the diversity of source materials. Recently, X-ray fluorescence (XRF) has emerged as a promising technique for assessing the chemical composition of CDW-R. However, its application remains limited in Brazil, requiring further investigation. In this context, this study aimed to determine the chemical composition of CDW-R samples and evaluate different sample preparation methods to identify the most suitable particle size and preparation procedure for XRF analysis. For this purpose, CDW-R samples were collected after 500 days under different temperature conditions and analyzed by XRF. The most representative results were obtained from samples that were crushed, sieved through a 0.60 mm mesh, and subjected to thermogravimetric analysis prior to XRF testing. The eight samples analyzed using this procedure exhibited low variability and a chemical composition consistent with values reported in the literature, with predominance of the main compounds associated with cementitious materials and soil particles. The results demonstrate the potential of XRF for the chemical characterization of CDW-R and highlight the importance of proper sample preparation.

KEYWORDS: Chemical Composition, Recycled Aggregates, Sample Preparation, X-Ray Fluorescence.

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) vêm sendo tratados nas últimas décadas como possíveis substitutos de agregados naturais na construção civil. Essa abordagem colabora para diminuir os impactos causados pela geração abundante e má gestão dos resíduos de construção. Neste sentido, diversos estudos foram conduzidos nas últimas décadas buscando avaliar a aplicabilidade desse "novo" material de construção em distintas obras geotécnicas.

Embora a sua aplicação já tenha sido obtidos resultados positivos em termos técnicos, ambientais (Banias et al., 2010; Blengini et al., 2010) e econômicos (Coelho e De Brito 2012a; 2012b), é necessário avaliar ~~com~~ características específicas que possam ser decorrentes da heterogeneidade do material a ser adotado. No cenário internacional, alguns países já utilizam agregados reciclados em diversos tipos de obra, uma vez que as usinas de beneficiamento fornecem produtos mais padronizados, ou seja, produtos que tenham em sua composição mais de 90%, em massa, de seu material constituído de concreto (ARC) ou resíduo de material asfáltico (RAP). No cenário nacional, o fornecimento desse tipo material é ainda incipiente, pois requer maior controle na sua triagem dentro dos canteiros de obra, no tratamento e separação dos resíduos ao serem recebidos nas usinas de beneficiamento, e no processo de britagem e posterior peneiramento.

Nesse cenário, o mercado de agregados reciclados brasileiro ainda necessita lidar com uma significativa heterogeneidade dos materiais constituíntes e variabilidade de suas propriedades. Portanto, para viabilizar o uso desses materiais, esses devem ser analisados juntamente com os outros materiais constituintes da obra. Diante disso, é crucial avaliar a composição química do agregado reciclado.

Dentre as técnicas que ganharam destaque nos últimos anos, está a fluorescência de Raios X (FRX), que é uma técnica analítica multi-elementar não destrutiva que, por dispersão de energia, é capaz de identificar elementos químicos constituintes da amostra testada.

No entanto, tendo em vista distribuição granulométrica dos agregados reciclados, faz-se necessária a redução do tamanho das partículas para a realização do ensaio. Sánchez-Cotte et al. (2020) realizaram a britagem de partículas graúdas e peneiramento para obtenção de partículas inferiores a 0,075 mm para a realização dos ensaios de FRX. Já Nedeljkovic et al. (2021) realizaram a moagem manual de agregados reciclados e ensaiaram partículas menores que 0,01mm.

Moreno-Pérez et al. (2018) verificaram que os resultados obtidos pela análise semi-quantitativa de ensaios de FRX apresentaram boa concordância com ensaios mais específicos, como difração de Raios X (DRX) e microanálise química. Limbachiya et al. (2007) investigaram a parte fina de um agregado reciclado de concreto (ARC) e constataram a presença de calcita, portlandita e picos menores de muscovita/ilita nos agregados reciclados, embora tenham sido diretamente proporcionais à sua composição original. Angulo et al. (2009) e Sánchez-Cotte et al. (2020) também reportaram significativa presença de calcita. Diferentemente dos estudos anteriores, Meizhu et al. (2011) avaliaram os resultados de FRX em termos da composição elementar dos componentes químicos.

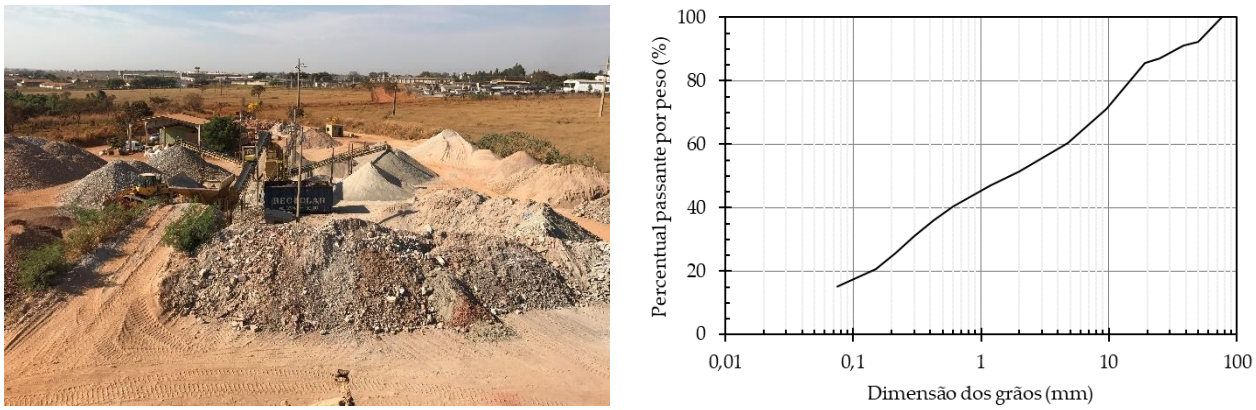
Limbachiya et al. (2007) salientam que as análises de FRX, apesar de já se encontrarem consolidadas, ainda precisam ser exploradas para caracterização de resíduos. Neste sentido, este artigo objetiva caracterizar resíduos de contrução e demolição reciclados e avaliar os distintos métodos de preparação de amostras para a realização dos ensaios de FRX.

2 METODOLOGIA

Deve-se salientar que os dados apresentados neste artigo fazem parte de um amplo estudo que engloba a durabilidade de geossintéticos, mais especificamente relacionada a danos e degradações de geossintéticos causadas por resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R). Assim, o escopo deste artigo não engloba a análise dos geossintéticos, mas sim as características químicas do RCD-R investigado.

2.1 Resíduo de construção e demolição reciclado (RCD-R)

O resíduo de construção e demolição reciclado (RCD-R) adotado neste estudo foi fornecido por uma usina de beneficiamento de resíduos localizada em Aparecida de Goiânia-GO (Figura 1a). Essa usina adota



(a) (b)

Figura 1. Resíduo de construção e demolição utilizado neste estudo: a) usina de beneficiamento, b) curva de distribuição granulométrica.

um processo duplo de britagem com britadores de mandíbula. O material processado é separado por um conjunto de peneiras, e seis agregados reciclados (de diferentes granulometrias) são fornecidos ao mercado. A distribuição granulométrica do material utilizado neste estudo está apresentada na Figura 1b.

2.2 Condição das amostras de RCD-R ensaiadas

O RCD-R investigado não foi ensaiado em sua condição natural, ou seja, após sua coleta na usina de beneficiamento. Neste caso, o RCD-R foi acondicionado em tanques de aço inoxidável junto à camadas de geossintéticos (geogrelhas ou geotêxteis) e o conjunto foi inundado com água destilada. A Figura 2 apresenta uma ilustração de um dos tanques e a forma de disposição dos geossintéticos e das camadas de RCD-R em seu interior.

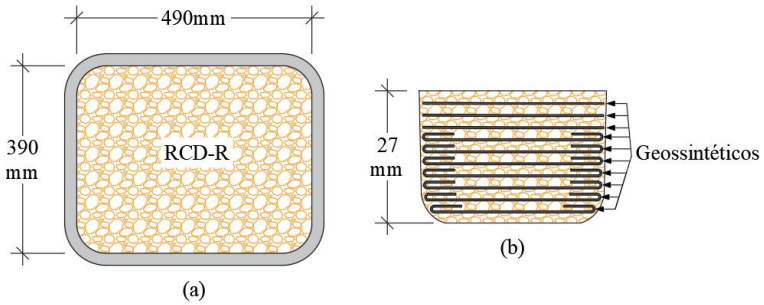
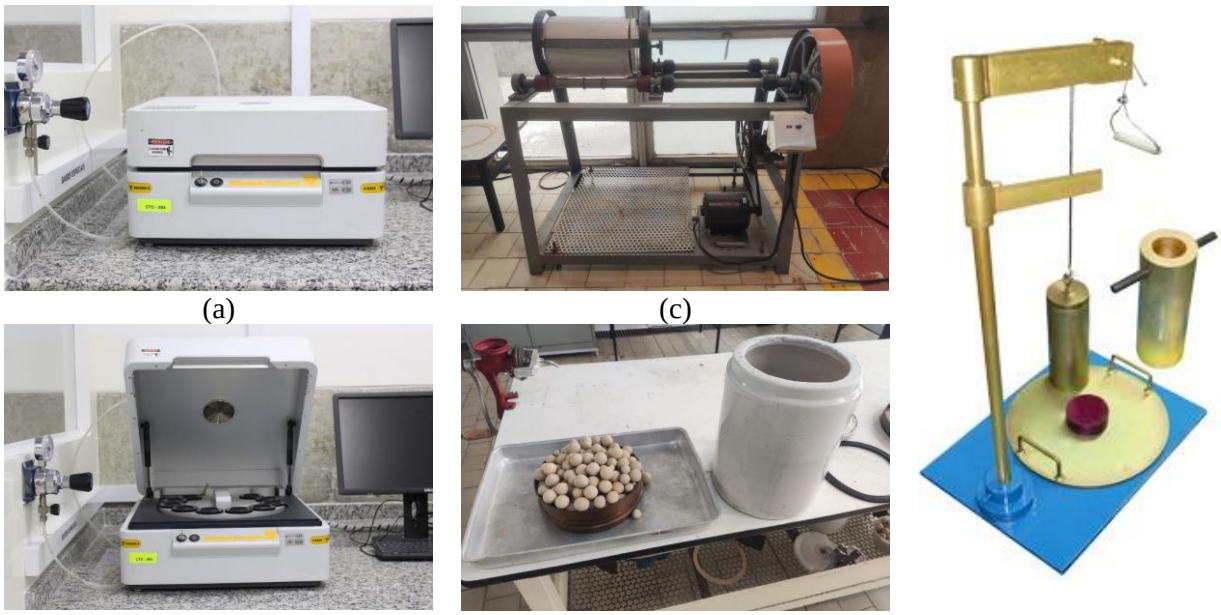


Figura 2. Tanque de degradação estanques em aço inoxidável: a) vista em planta e b) seção transversal típica dos tanques.

O RCD-R foi acondicionado oito tanques durante um período de 500 dias, onde quatro desses foram mantidos em temperatura ambiente e os outros quatro em temperatura de 50° ± 3°C. Após esse período, os geossintéticos foram exumados e amostras de RCD-R coletadas de cada tanque para realização do ensaio de FRX.

2.3 Ensaios de fluorescência de Raios X (FRX)

Os ensaios de FRX foram realizados no Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), no equipamento da marca Malvern Panalytical, conforme apresentado na Figura 3a. Tendo em vista que o equipamento não é dimensionado para a realização de ensaios em solos, ou mesmo resíduos de construção, fez-se necessário preparar as amostras antes de realizar os ensaios. Distintos métodos de preparação foram adotados até determinar o método de preparo ideal das amostras. A Tabela 1 descreve os métodos de preparo adotados.



(a) (c) (b) (d) (e)

Figura 3. Equipamentos utilizados no estudo: (a) e (b), para a realização do ensaio de FRX; (c) e (d) trituração com moinho de bolas, e (e) trituração com a queda livre de peso.

Tabela 1. Descrição dos métodos de preparo adotados.

Método de preparo	Descrição
M1	Peneiramento do material em malha de abertura de 2,00 mm [1]
M2	Peneiramento do material em malha de abertura de 1,18 mm [1]
M3	Peneiramento do material em malha de abertura de 0,60 mm [1]
M4	Fase líquida do sistema RCD-R/água [2]
M5	Trituração do material com moinho de bolas durante 24 h (Figura 3b), seguido de peneiramento em malha de abertura de 0,60 mm [1]
M6	Trituração do material com equipamento a queda livre de peso (Figura 3e), seguido de peneiramento em malha de abertura de 0,60 mm [1]
M7	Realização de ensaio de termogravimetria, seguido dos métodos adotados em 'M5'.
M8	Realização de ensaio de termogravimetria, seguido dos métodos adotados em 'M6'.

Nota: [1] Utilizou-se as partículas passante na peneira indicada para a realização do ensaio.
[2] Amostra obtida pela coleta da fase líquida sobrenadante presente nos recipientes após 500 dias de exposição do RCD-R em água destilada.

Após a realização dos ensaios, o equipamento fornece os percentuais de material inorgânico na composição da amostra por meio de uma análise semi-quantitativa. Essa análise semi-quantitativa consiste em quantificar as amostras através de padrões feitos de materiais puros utilizando o módulo Omnian do equipamento. Esse módulo é a combinação de amostras de software e configuração permitindo realizar ajustes finos do software Omnian e do espectrômetro, enquanto incorpora recursos de elementos espectrais que superam as limitações semiquantitativas dando resultados precisos e confiáveis. Cabe resaltar que o equipa mento abrange elementos de F a U, apresentando limitações de identificação de alguns componentes químicos mais leves, tais como: Na e Mg.

Os métodos de preparação de amostras foram avaliados de forma sequencial. Inicialmente, os métodos M1 e M2 foram investigados para verificar a influência do tamanho das partículas. Após a constatação de que as partículas ainda apresentavam dimensões inadequadas para análise por FRX, adotou-se o método M3. Em seguida, foram avaliadas a fase líquida (M4) e duas técnicas de trituração (M5 e M6). Por fim, em função dos

resultados obtidos pelos métodos anteriores, foram desenvolvidos os métodos M7 e M8, que incorporaram informações provenientes de ensaios de termogravimetria.

Os ensaios de análise termogravimétrica (TG) foram realizados de acordo com a ASTM E1131. Utilizou-se um analisador termogravimétrico TA Instruments Q50, capaz de realizar medidas contínuas de massa com resolução de 0,1 μg. Amostras com massa entre 10 e 15 mg foram aquecidas sob atmosfera inerte de nitrogênio (50 mL/min) a uma taxa de aquecimento de 10°C/min até 560°C. Após atingir essa temperatura, a amostra permaneceu isotermicamente por 10 minutos, até estabilização da massa. A perda de massa observada durante o ensaio foi utilizada para estimar a fração de compostos voláteis e demais constituintes não incorporados à fração inorgânica considerada na análise por FRX., enquanto a massa residual foi considerada representativa da fração inorgânica da amostra.

O percentual de material inorgânico obtido nos ensaios de TG foi posteriormente utilizado como dado de entrada no módulo Omnian do equipamento de fluorescência de Raios X (FRX). Dessa forma, a quantificação semi-quantitativa dos compostos químicos foi realizada considerando apenas a fração inorgânica da amostra, permitindo melhorar o fechamento composicional dos resultados obtidos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Investigação dos métodos de preparação das amostras

Os dois métodos inicialmente utilizados de preparação de amostra (M1 e M2) forneceram partículas ainda muito grandes para a realização dos ensaios. Já a preparação M3, resultou em amostras com dimensões factíveis para realização do ensaio, revelando, assim, a necessidade de peneiramento do material em malha com 0,60 mm de abertura.

Os resultados dos métodos de preparação M3 a M6 estão apresentados na Tabela 2. Neste caso, os resultados obtidos foram em função dos elementos químicos. Primeiramente, cabe ressaltar os resultados com o método de preparo M4 (fase líquida do sistema RCD-R/água). Notou-se que esses foram muito pouco representativos, elucidando que a composição química da fase líquida do sistema RCD-R/água diverge daquelas obtidas de seu material sólido.

Tabela 2. Composição (elementos químicos) do RCD-R adotando diferentes métodos de preparação de amostra.

Elemento	Em composição em função do método de preparação das amostras			
	M3 (%)	M4	M5 (%)	M6 (%)
Ca	19,80	0,11%	16,92	15,38
Si	8,48	71,6 ppm	9,97	12,97
Fe	8,16		8,05	6,41
Al	3,38	102,6 ppm	3,05	3,04
K	1,23	210,7 ppm	1,79	1,81
Ti	1,05		0,90	0,73
S	0,35		0,33	0,34
Mg	0,29		0,33	0,32
Sr	0,12		0,10	0,10
Total	42,26		41,42	41,10

Já no caso dos métodos de preparo M3, M5 e M6, notou-se que não se obteve um quantitativo total representativo da amostra, ou seja, com a análise em termos dos elementos químicos, o equipamento somente conseguiu fornecer um valor próximo de 42% dos materiais constituintes do RCD-R analisado. Esse comportamento sugere limitação do balanço de massa adotado pelo software, possivelmente associada à ausência de informação prévia sobre a fração orgânica e/ou componentes leves não detectados adequadamente

pelo equipamento.

Deste modo, optou-se por realizar ensaios de termogravimetria (TG) para avaliar a presença ou não de matéria orgânica em sua composição. Os resultados do ensaio de TG revelaram ínfima fração de compostos voláteis e material não inorgânico. Este dado foi atribuído como dado de entrada antes do tratamento dos dados nas amostras preparadas com os métodos M7 e M8. Os resultados, apresentados em termos dos compostos químicos na Tabela 3, mostraram-se mais condizentes, ou seja, estimaram mais de 98% da composição do RCD-R. Assim, a incorporação dos resultados de TG permitiu restringir a fração não inorgânica da amostra, elevando o fechamento do balanço composicional para valores superiores a 98%. Ademais, os métodos adotados para trituração das amostras pouco influenciaram os resultados encontrados. Tendo em vista que a trituração com a queda livre do peso não requer o uso de equipamento por um período 24 horas, o método de preparação de amostra M8 (Tabela 1) foi utilizado nas demais amostras.

Tabela 3. Composição (composto químico) do RCD-R adotando os métodos de preparação M7 e M8.

Composto	Composição em função do método de preparação das amostras (%)	
	M7	M8
SiO_2	52,67	44,25
CaO	20,31	24,76
Al_2O_3	13,83	14,66
Fe_2O_3	6,48	9,10
K_2O	2,35	2,55
SO_3	1,18	1,26
MgO	1,86	1,95
TiO_2	0,92	1,25
BaO	0,13	-
Outros[1]	0,27	0,22

Nota: [1] Pode conter Rb_2O, ZnO, Nb_2O_5, Y_2O_3, PbO, Cr_2O_3, ZrO_2, SnO_2, HgO, Cl, NiO, MnO, CuO, e Ga_2O_3 com concentrações inferiores a 1000 ppm.

3.2 Composição química das amostras de RCD-R coletadas nos tanques

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de fluorescência de Raios X realizados nas amostras coletadas dos tanques sob condição de temperatura ambiente (T1 a T4) e também sob temperatura de 50 ± 3°C (T5 a T8). O primeiro aspecto a ser enaltecido dos resultados encontrados está relacionado à variabilidade. Nota-se que independente do composto analisado, o coeficiente de variação é inferior a 11%. Ao analisar os

Tabela 4. Composição RCD-R coletados dos tanques estanques após 500 dias de exposição.

Composto	Percentual do composto (%)								Média	COV
	Temperatura ambiente				Temperatura de 50° ± 3°C					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8		
SiO_2	41.75	40.87	43.02	39.12	40.60	41.95	40.67	42.64	41.33	3,06
CaO	28.63	29.01	29.21	32.59	24.92	27.07	31.54	29.47	29.05	8,23
Al_2O_3	13.53	13.76	12.39	11.65	13.92	14.30	12.23	11.83	12.95	8,01
Fe_2O_3	8.42	8.73	7.99	8.64	8.87	8.97	8.49	8.51	8.58	3,54
K_2O	2.41	2.25	2.16	2.07	2.48	2.46	1.95	2.11	2.23	8,76
SO_3	1.84	2.01	1.74	1.87	1.63	1.76	1.38	1.71	1.74	10,74
MgO	1.72	1.83	1.86	2.01	1.74	1.53	2.06	2.13	1.86	10,76
TiO_2	1.17	1.27	1.11	1.43	1.28	1.40	1.14	1.10	1.24	10,20
BaO	0.15	0.00	0.14	0.13	0.14	0.14	0.13	0.15	0.14	5,56
SrO	0.12	0.11	0.10	0.13	0.00	0.11	0.12	0.11	0.11	8,42
Outros [1]	0.27	0.18	0.27	0.35	4,42	0.32	0.29	0.26	0.76	3,06

Nota:[1] Pode conter Rb_2O, ZnO, Nb_2O_5, Y_2O_3, PbO, Cr_2O_3, ZrO_2, SnO_2, HgO, Cl, NiO, MnO, CuO, e Ga_2O_3 com concentrações inferiores a 1000 ppm.

compostos de maior predominância na composição química do resíduo, nota-se que essa variação foi inferior a 8 %. Deste modo, por se tratar de o mesmo RCD-R de origem, porém acondicionado em diferentes tanques, nota-se pouca variação na composição química do resíduo, o que pode ser visto positivamente para o estudo tendo em vista que os geossintéticos estiveram em contato com materiais reciclados de composição química semelhante.

Contudo, mais importante do que a análise dos resultados em seus valores absolutos é avaliar se as composições encontradas estão de acordo com o material ensaiado. A composição química obtida por FRX (Tabela 4) enquadra-se nas faixas tipicamente reportadas para RCD-R misto e RCA: SiO_2 39–70%, CaO 10–36%, Al_2O_3 5–20%, Fe_2O_3 0,5–14% e SO_3 usualmente < 3,9% (Kou et al., 2005; Barbudo et al., 2012; Ulsen et al., 2010). O SiO_2 decorre primariamente de quartzo e silicatos provenientes de agregados naturais, areia e materiais cerâmicos. O CaO reflete argamassa aderida, pasta de cimento hidratada e calcita remanescentes, sendo o enriquecimento cálcico a principal diferença química entre agregados reciclados e naturais (Kou et al., 2005; Angulo, 2005; Moreno-Pérez et al., 2020). Al_2O_3 e Fe_2O_3 estão associados a cerâmicas vermelhas, argilominerais, feldspatos e, em menor grau, fases do clínquer e solos ferruginosos (Angulo, 2005; Barbudo et al., 2012). A presença de SO_3 (1,74%) indica fases sulfatadas (gesso, etitringita) oriundas de componentes cimentícios e argamassas (Sánchez-Cotte et al., 2020).

Do ponto de vista geotécnico, o elevado CaO sinaliza maior teor de pasta aderida, o que correlaciona-se com maior absorção de água, menor massa específica aparente e comportamento mecânico mais variável (Angulo, 2005; Kou et al., 2005). Geoambientalmente, a dissolução de fases cálcicas gera lixiviados com pH frequentemente superior a 10 e alcalinidade expressiva, enquanto o SO_3 pode contribuir para liberação de sulfatos; ambos os fenômenos são atenuados pela carbonatação progressiva do material (Gupta et al., 2018; Nunes et al., 2020). Em aplicações com geossintéticos, a alcalinidade do RCD-R pode acelerar hidrólise em polímeros suscetíveis, requerendo avaliação de compatibilidade (Fleury, 2024).

3 CONCLUSÃO

A heterogeneidade dos resíduos de construção e demolição de reciclados (RCD-R) é uma característica marcante desse material. Este artigo investigou distintos métodos de preparação de corpos de prova para caracterizçaão química via FRX, determinou a metodologia mais adequada e, posteriormente, caracterizou oito amostras de RCD-R. De posse dos resultados encontrados, destacam-se as seguintes conclusões.

- O procedimento composto por trituração mecânica por queda livre de peso, peneiramento em malha de 0,60 mm, ensaio de termogravimetria e posterior análise por FRX mostrou-se o método mais adequado para caracterização química semiquantitativa do RCD-R investigado;
- Embora seja necessária a trituração das amostras e a realização de ensaios em amostras menores que 0,60 mm, os diversos métodos de trituração investigados não apresentaram influência significativa nos resultados encontrados;
- A realização de ensaios de termogravimentria nas amostras antes da execução do ensaio de fluorescência de Raios X (FRX) mostrou-se valiosa por permitir restringir a fração não inorgânica considerada no balanço composicional inserida como in-put no tratamento dos resultados de FRX. Assim, os resultados decorrentes deste último ensaios se tornaram mais precisos;
- Os ensaios de FRX realizados nas amostras de RCD-R revelaram pequena variabilidade na composição química do material. Destacam-se a presença de dióxido de sílica e óxido de cálcio que são provenientes ~~de~~ dos principais compostos do cimento e do própio solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Angulo, S.C. (2005). *Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos*. Tese de Doutorado, EP-USP.

Angulo, S.C., Ulsen, C., John, V.M., Kahn, H., Cincotto, M.A. (2009). Chemical–mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil. *Waste Management*. 29(2), p. 721-730.

Banias, G., Achillas, C., Vlachokostas, C., Moussiopoulos, N., Tarsenis, S. (2010). Assessing multiple criteria for the optimal location of a construction and demolition waste management facility. *Build Environ.* 45(10), p. 2317–2326.

Barbudo, A., de Brito, J., Evangelista, L., Bravo, M., Agrela, F. (2012). Chemical–mineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from construction and demolition concrete. *Waste Management*, 32(11), 2200–2208.

Barbudo, A., Galvín, A.P., Agrela, F., Ayuso, J., Jiménez, J.R. (2012). Correlation analysis between sulphate content and leaching of sulphates in recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Waste Manag*. 32(6), p. 1229–1235.

Blengini, G.A., Garbarino, E. (2010). Resources and waste management in Turin (Italy): The role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. *J Clean Prod.* 18(10–11), p. 1021–1030.

Coelho, A., De Brito, J. (2012b). Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal - Part II: Economic sensitivity analysis. *J Clean Prod.*, 39, p. 329–337.

Coelho, A., De Brito, J. (2012b). Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal - Part I: Location, materials, technology and economic analysis. *J Clean Prod.*, 39, 338–352.

Fleury, M.P. (2024). *Durability of geosynthetics in reinforced structures using recycled construction and demolition waste as backfill material: in-isolation and successive effects*. Tese de Doutorado, EESC-USP.

Kou, S.C., Poon, C.S., Etxeberria, M. (2005). Chemical–mineralogical characterisation of coarse recycled aggregates and natural aggregates in concrete. *Waste Management*, 27(4), 555–562.

Limbachiya, M.C.; Marrocchino, E.; Koulouris, A. (2007). Chemical–mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate. *Waste Management*. 27(2), p. 201-208.

Moreno-Pérez, E., et al. (2020). The chemical-mineralogical characterization of recycled concrete aggregates from different sources and their potential reactions in asphalt mixtures. *Materials*, 13(24), 5633.

Moreno-Pérez, Emiliano; Hernández-Ávila, Juan; Rangel-Martínez, Yamile; Cerecedo-Sáenz, Eduardo; Arenas-Flores, Alberto; Reyes-Valderrama, Ma.; Salinas-Rodríguez, Eleazar. (2018). Chemical and Mineralogical Characterization of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste from Mexico City. *Minerals*. 8(6), p. 237.

Nedeljković, Marija; Visser, Jeanette; Nijland, Timo G.; Valcke, Siska; Schlangen, Erik (2021). Physical, chemical and mineralogical characterization of Dutch fine recycled concrete aggregates: a comparative study. *Construction And Building Materials*. 270, p. 121475

Nunes, F.F., et al. (2020). Environmental assessment, mechanical behavior and new leaching impact proposal of mixed recycled aggregates to be used in road construction. Journal of Cleaner Production, 277, 124227.

Sánchez-Cotte, E.H.; Pacheco-Bustos, C.A.; Fonseca, A.; Triana, Y.P.; Mercado, R.; Yepes-Martínez, J.; Lagares Espinoza, R.G. (2020). The Chemical-Mineralogical Characterization of Recycled Concrete Aggregates from Different Sources and Their Potential Reactions in Asphalt Mixtures. *Materials*. 13(24), p. 5592.

Gupta, G., Kluge, M., Chadik, P.A., Townsend, T.G. (2018). Recycled concrete aggregate as road base: leaching constituents and neutralization in the environment. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(3), 04017308.

Ulsen, C., Kahn, H., Angulo, S.C., John, V.M. (2010). Chemical composition of mixed construction and demolition recycled aggreagtes from the state of São Paulo. *Rev Esc Minas*. 63(2), p. 339–346.