

Caracterização de resíduo de construção civil (RCC) visando sua aplicação como matéria-prima alternativa na fabricação de cimento Portland

(Characterization of civil construction waste for its application as alternative raw material in the manufacture of Portland cement)

F. N. COSTA^{1*}; D. V. RIBEIRO²

¹PPEC – Programa de Pós-Graduação em Eng. Civil da Universidade Federal da Bahia
Rua Aristides Novis, 02. Federação. 40210-630. Salvador /BA

²UFBA – Universidade Federal da Bahia – verasribeiro@hotmail.com
Rua Aristides Novis, 02. Federação. 40210-630. Salvador /BA

*fernandacosta@ufrb.edu.br

Resumo

Diversos impactos causados ao meio ambiente estão associados à geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), com uma geração, no Brasil, em 2017, de aproximadamente 78,4 milhões de toneladas, dos quais 45 milhões de toneladas são resíduos de construção civil (RCC) que, dispostos de forma inadequada, causam diversos impactos ao meio ambiente e à sociedade. Neste contexto, propõe-se a caracterização do RCC com o objetivo de identificar seu potencial de aplicação na produção de cimentos ecoeficientes. Para isto, foi realizada a caracterização física, morfológica, química e mineralógica de diferentes amostras de RCC e os resultados obtidos mostraram que este resíduo apresenta uma heterogeneidade do ponto de vista físico, químico e mineralógico, no entanto, apresentaram teores significativos de silício, cálcio, alumínio e ferro e de outros elementos que irão auxiliar na formação das principais fases do cimento Portland, possibilitando o seu uso como matéria-prima alternativa para a indústria cimenteira.

Palavras chave: resíduo de construção civil, caracterização, matéria-prima, reaproveitamento, clínquerização.

Abstract

Several environmental impacts are associated with the generation of solid urban waste (SUW), with a generation in Brazil in 2017 of approximately 78.4 million tons, of which 45 million tons are construction waste (CW) that, inappropriately arranged, cause diverse impacts to the environment and society. In this context, it is proposed to characterize the residue in order to identify its potential for application in the production of eco-efficient cements. For this, the physical, morphological, chemical and mineralogical characterization of different CW samples was performed and the results showed that this residue presents a heterogeneity from the physical, chemical and mineralogical point of view, however, they presented significant levels of silicon, calcium, aluminum and iron and other elements that will help in the formation of the main phases of Portland cement, making possible its use as an alternative raw material for the cement industry.

Keywords: construction waste, characterization, raw material, reuse, sintering.

INTRODUÇÃO

Diversos impactos causados ao meio ambiente estão associados à geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) e ao crescente processo de urbanização. No Brasil, em 2017, a geração total de RSU foi de 78,4 milhões de toneladas, dos quais 45,3 milhões de toneladas são resíduos de construção civil (RCC) [1]. Empresas construtoras têm sido pressionadas para, efetivamente, reduzirem a geração de resíduos e realizarem práticas de destino adequado [2, 3], o que não ocorre quando o RCC é disposto apenas em aterros.

Por outro lado, a indústria cimenteira, material manufaturado mais produzido e utilizado mundialmente, é a terceira maior consumidora de energia do mundo [4], sendo responsável por cerca de 5% da emissão mundial do gás carbônico [5, 6]. Assim, alternativas que visem a redução da emissão de CO₂ na produção de cimento vão ao encontro às diretrizes e compromissos assumidos no Acordo de Paris, firmado na 21ª Conferência da ONU sobre Mudança do Clima (UNFCCC) [7, 8].

As cimenteiras buscam, assim, em todo o mundo, formas de reduzir o consumo de energia e emissão de gases poluentes [9]. Entre estas alternativas, pode estar a reutilização de RCC como matéria-prima alternativa no processo de produção.

Variados estudos têm mostrado a viabilidade técnica da substituição de diferentes tipos de resíduos e subprodutos industriais como matéria-prima alternativa na fabricação de cimento Portland, tais como uso de resíduos de concreto reciclado [10], de resíduos de telhas cerâmicas e de revestimentos cerâmicos [11] e, ainda, de resíduos de fibrocimento [12]. Diferentemente desses trabalhos, pretende-se dar outra abordagem na utilização do RCC ao considerar todas as partes dos constituintes dos resíduos de construção civil do tipo classe A, por meio da utilização de sua parte fina.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo apresentar a caracterização do RCC e verificar a viabilidade técnica de sua utilização como matéria-prima alternativa na produção de cimento Portland.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Foram utilizadas amostras de RCC classe A [2] provenientes da Unidade de Valorização de Resíduos Grajaú S.A. (UVRG), localizada na cidade de São Paulo [13].

O início do processo de produção do RCC se dá em uma peneira vibratória, em que, por diferença granulométrica, o resíduo é separado em duas correntes, uma com tamanho maior que

10 mm e outra menor que 10 mm. Os materiais com tamanho maior que 10 mm são depositados diretamente no triturador primário para seu processamento. Nesse momento, é gerado um material pulverulento, conhecido como fino de resíduo de construção civil (FRCC), que é separado do restante por meio de um ciclone, levando-o até baias de armazenamento [14].

O material restante passa por um novo peneiramento, com o objetivo de obter o RCC com dimensões menores que 40 mm. O material que ficar retido neste processo de peneiramento passa por um novo processo de britagem e peneiramento. Por fim, o material com tamanho inferior a 40 mm, ao cair na terceira peneira, é separado em três frações de dimensões entre 0 e 10 mm, 10 e 20 mm e 20 e 40 mm [14].

Nessa pesquisa foram utilizadas as frações finas do resíduo de construção civil da UVRG a partir de duas fontes diferentes:

a) Finos de resíduo de construção civil (FRCC) provenientes da primeira etapa do processo de beneficiamento, separados das demais frações por ação do ciclone, chamados nessa pesquisa de FRCC1, FRCC2, FRCC3 e FRCC4;

b) Finos de resíduo de construção civil (FRCC) provenientes da britagem de outras frações do RCC, chamados nessa pesquisa de FRCC₀₋₁₀ (formado a partir de grãos com diâmetro máximo entre 0 a 10 mm); FRCC₁₀₋₂₀ (a partir de grãos com diâmetro máximo entre 10 a 20 mm); e FRCC₂₀₋₄₀ (a partir de grãos com diâmetro máximo entre 20 a 40 mm).

Além de amostras de RCC, foram utilizadas amostras de calcário e argila, disponibilizadas por uma cimenteira localizada no Estado de Sergipe.

Métodos

Foram recebidos quatro lotes diferentes de cada tipo de RCC que, após homogêneos, tiveram amostras representativas selecionadas por meio de quarteamento, até obtenção da quantidade necessária para os estudos. O tamanho dos grãos foi diminuído, utilizando um moinho de mandíbulas e, posteriormente, um moinho horizontal de bolas cerâmicas, até que fosse atingida a granulometria desejada. A última etapa do beneficiamento do RCC foi o peneiramento dos materiais em peneira de abertura de malha igual a 75 µm. As amostras de calcário e argila também foram moídas até ficarem com partículas inferiores a 75 µm.

Com as amostras preparadas, foram realizadas as análises físicas, químicas, morfológicas e mineralógicas. A caracterização física do RCC contemplou a avaliação da massa específica, da área superficial específica e da composição granulométrica. A determinação da massa específica foi feita utilizando o aparelho Picnômetro *Micromeritics AccuPyc II 1340* (a gás

hélio), a área superficial foi obtida pelo método proposto por Braunauer, Emmet e Teller (BET), com o equipamento da Micromeritics, modelo Gemini VII.

A avaliação da distribuição do tamanho das partículas foi realizada apenas no RCC, por meio de granulometria a *laser*, utilizando um analisador de distribuição do tamanho de partículas modelo *Mastersizer 2000* da *Malvern Panalytical*, da Universidade Estadual de Feira de Santana.

Para a avaliação morfológica, as amostras do RCC foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando um equipamento da Tescan, modelo Vega 3 LMU, do Laboratório de Caracterização de Materiais do Instituto Federal da Bahia (IFBA/SSA). A caracterização química foi realizada por meio da determinação da composição química das amostras de RCC, de argila e de calcário, com a técnica de espectroscopia por Fluorescência de Raios X (FRX) com espectrofotômetro modelo *S2 Ranger* da Bruker, também do IFBA.

O RCC foi caracterizado mineralogicamente por difração de raios X (DRX), utilizando um difratômetro *D2 Phaser* (Bruker), com tubo de alvo de cobre (radiação $K\alpha$ com comprimento de onda de $1,54060 \text{ \AA}$) de 30 kV e 10 mA, sem sistema de filtragem com monocromador secundário. Os espectros de difração foram obtidos na faixa de 2θ de 5° a 90° , utilizando a varredura com incrementos de $0,02^\circ$ e tempo de coleta de 0,2 s/passos. As fases presentes nas amostras foram identificadas com auxílio do *software DIFFRAC plus - EVA*, com base de dados no sistema COD (*Crystallography Open Database*).

A última etapa da pesquisa foi a quantificação das fases mineralógicas de clínquer Portland a serem produzidos com o RCC e do clínquer de referência, sem adição do RCC, através do cálculo da composição mineralógica potencial de Bogue [15], expressas nas equações a seguir, a partir da composição de óxidos das matérias-primas da farinha.

$$C_3S = 4,0710 \text{ CaO} - 7,6024 \text{ SiO}_2 - 6,7187 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,4297 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \quad (\text{A})$$

$$C_2S = 8,6024 \text{ SiO}_2 + 5,0683 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 1,0785 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 3,0710 \text{ CaO} \quad (\text{B})$$

$$C_3A = 2,6504 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,6920 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \quad (\text{C})$$

$$C_4AF = 3,0432 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \quad (\text{D})$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização física

Foi realizada a caracterização física das amostras de RCC, da argila e do calcário, estando os valores de massa específica e área superficial específica BET apresentados na Tabela I. Pode-

se observar que a argila possui área superficial específica BET superior à dos resíduos. Devido à heterogeneidade do FRCC, principalmente no que se refere à área superficial BET, os valores variaram entre 11,0113 e 20,3902 m²/g.

Tabela I – Massa específica e área superficial BET no FRCC, argila e calcário.

Material	Massa Específica (g/cm ³)	Área Superficial BET (m ² /g)
FRCC1	2,4691 ± 0,0041	16,7010
FRCC2	2,3823 ± 0,0029	20,3902
FRCC3	2,4556 ± 0,0034	18,2231
FRCC4	2,5806 ± 0,0027	15,9237
FRCC ₀₋₁₀	2,6238 ± 0,0027	15,9205
FRCC ₁₀₋₂₀	2,7329 ± 0,0023	11,0113
FRCC ₂₀₋₄₀	2,6342 ± 0,0040	13,6570
Argila	2,6985 ± 0,0020	30,1725
Calcário	2,7255 ± 0,0014	5,8454

Entre os lotes de FRCC analisados, o FRCC2 apresentou maior área superficial BET, indicando que esse tipo de resíduo pode ser o mais reativo no momento da clínquerização, entretanto, todos os FRCC apresentam área superficial elevada, superior à do calcário. Esse parâmetro é um indicativo da finura ou de uma maior rugosidade superficial do material, sendo diretamente proporcional à reatividade.

As distribuições dos tamanhos das partículas das amostras de RCC, obtidas por meio de granulometria a *laser*, estão apresentados na Figura 1. A partir da análise das curvas da distribuição granulométrica, é possível visualizar que os grãos dos RCC beneficiados possuem tamanho médio D₅₀ inferior à 75 µm, o que é importante para facilitar a adequada reação destes materiais com as demais matérias-primas para produção de cimento [13].

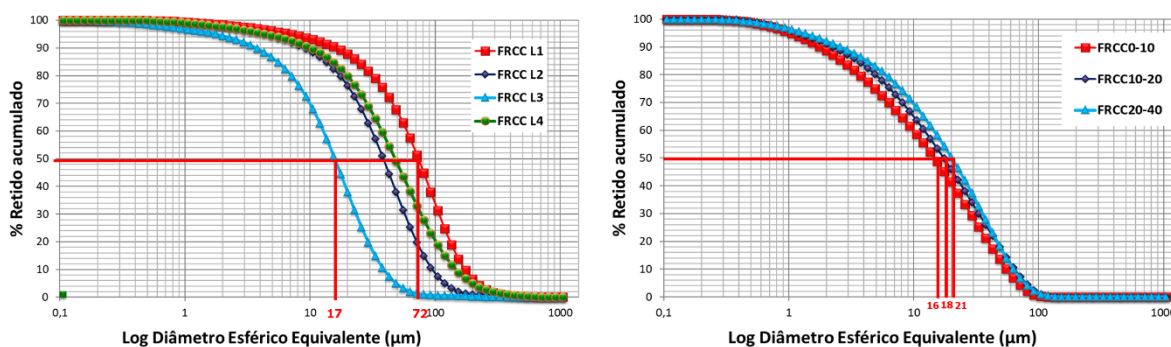


Figura 1 – Distribuição do tamanho de partículas do (A) FRCC1 ao FRCC4 e (B) FRCC₀₋₁₀; FRCC₁₀₋₂₀; e FRCC₂₀₋₄₀, obtidas por granulometria a *laser*

Caracterização morfológica

A Figuras 2 e 3 mostram imagens das sete diferentes amostras de RCC avaliadas, onde é possível verificar a existência de partículas com diversos formatos, indicativos de materiais com variada composição, também sugerindo heterogeneidade entre as diferentes amostras. Nota-se a existência de grãos de formatos diversos, como circulares, lamelares, em forma de bastões bem como formatos irregulares, possivelmente associados ao processo de moagem, reduzindo o tamanho das partículas.

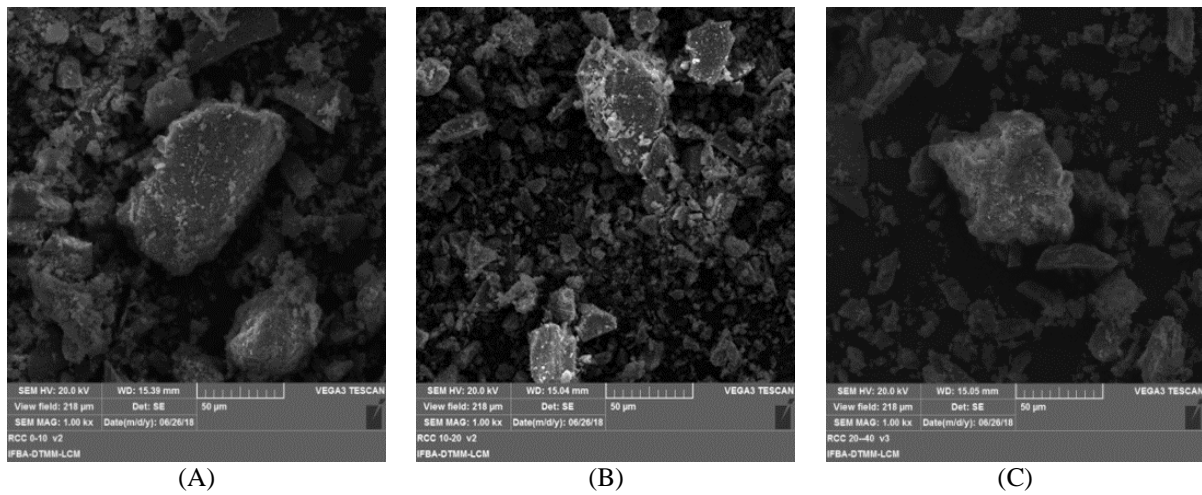


Figura 2 – Morfologias dos FRCCs, obtidas por MEV, referentes aos lotes (A) FRCC₀₋₁₀; (B) FRCC₁₀₋₂₀; (C) FRCC₂₀₋₄₀

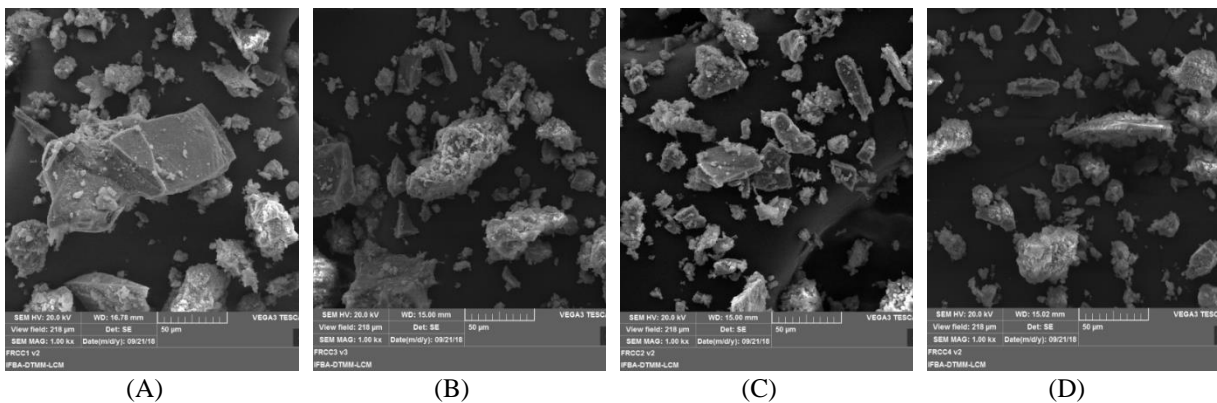


Figura 3 – Morfologias dos FRCC, obtidas por MEV, referentes aos lotes (A) FRCC1; (B) FRCC2; (C) FRCC3 e (D) FRCC4

Caracterização química

A Tabela II apresenta a composição química dos FRCC, além da argila e do calcário, materiais tradicionalmente utilizados na fabricação de cimento Portland. Observa-se que os resíduos de construção civil são ricos em silício, cálcio, alumínio e ferro, além de outros

elementos em menor proporção, como magnésio, enxofre, sódio, potássio e titânio. Entre esses materiais, o FRCC1 apresenta-se como a maior fonte de óxido de cálcio (26,7%), seguido pelo FRCC3 (22,4%). Quanto maior o conteúdo de CaO mais favorável é a sua utilização no clínquer. Este óxido de cálcio presente no RCC se constitui em uma fonte ambientalmente adequada, por não necessitar do processo de descarbonatação, com consequente geração de CO₂, tal como ocorre com o calcário, por exemplo, principal matéria-prima utilizada na fabricação de cimento Portland.

Tabela II – Caracterização química, em óxidos, obtida por meio de FRX, para amostras de FRCC, calcário e argila

Material	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Outros	PF
FRCC 1	28,82	26,73	7,50	3,21	3,38	1,74	1,65	1,40	0,55	0,23	24,80
FRCC 2	33,27	21,87	9,80	3,20	2,58	1,59	0,68	1,78	0,58	0,57	24,10
FRCC 3	33,66	22,42	8,74	5,09	2,39	1,41	-	1,80	0,77	0,92	22,80
FRCC 4	38,41	20,23	10,68	4,12	2,81	1,42	1,57	2,13	0,72	0,61	17,30
FRCC ₀₋₁₀	39,02	17,22	13,76	4,49	2,81	1,00	0,83	2,23	0,79	0,60	17,25
FRCC ₁₀₋₂₀	45,12	16,46	11,83	4,19	3,45	3,21	2,04	0,81	0,65	0,75	11,50
FRCC ₂₀₋₄₀	42,45	17,50	11,67	4,03	3,44	2,82	1,98	0,86	0,60	0,75	13,90
Argila	58,42	0,26	23,55	4,79	1,18	0,12	-	1,39	1,10	0,35	8,85
Calcário	10,92	44,04	3,20	1,28	2,13	0,10	-	0,58	0,18	0,08	37,50

*PF = Perda ao fogo

Entre as amostras de FRCC analisadas, a que apresentou maior teor de sílica é o FRCC₁₀₋₂₀ (45,1%) seguida pelo FRCC₂₀₋₄₀ (42,4%). Entre as matérias-primas tradicionalmente utilizadas na produção de clínquer, a argila é a fonte principal de sílica, ferro e alumínio e o calcário é fonte de cálcio, na forma de carbonato de cálcio (CaCO₃) [16, 17]. A partir dos resultados apresentados na Tabela II, é possível verificar que os FRCC podem substituir parte do sistema argila-calcário.

Caracterização mineralógica

A Figura 4 apresenta os difratogramas de raios X das amostras de FRCC utilizadas. É possível observar que o material contém variadas fases cristalinas, contendo cálcio, silício, alumínio e ferro, elementos importantes para a produção do clínquer Portland.

As diversas fases cristalinas existentes evidenciam o caráter heterogêneo dos FRCC, compostos por materiais cimentícios hidratados (argamassas e concretos), blocos cerâmicos e de concreto, placas e telhas cerâmicas, argilominerais provenientes de solos, rochas ornamentais (granitos e mármore), agregados, entre outros materiais.

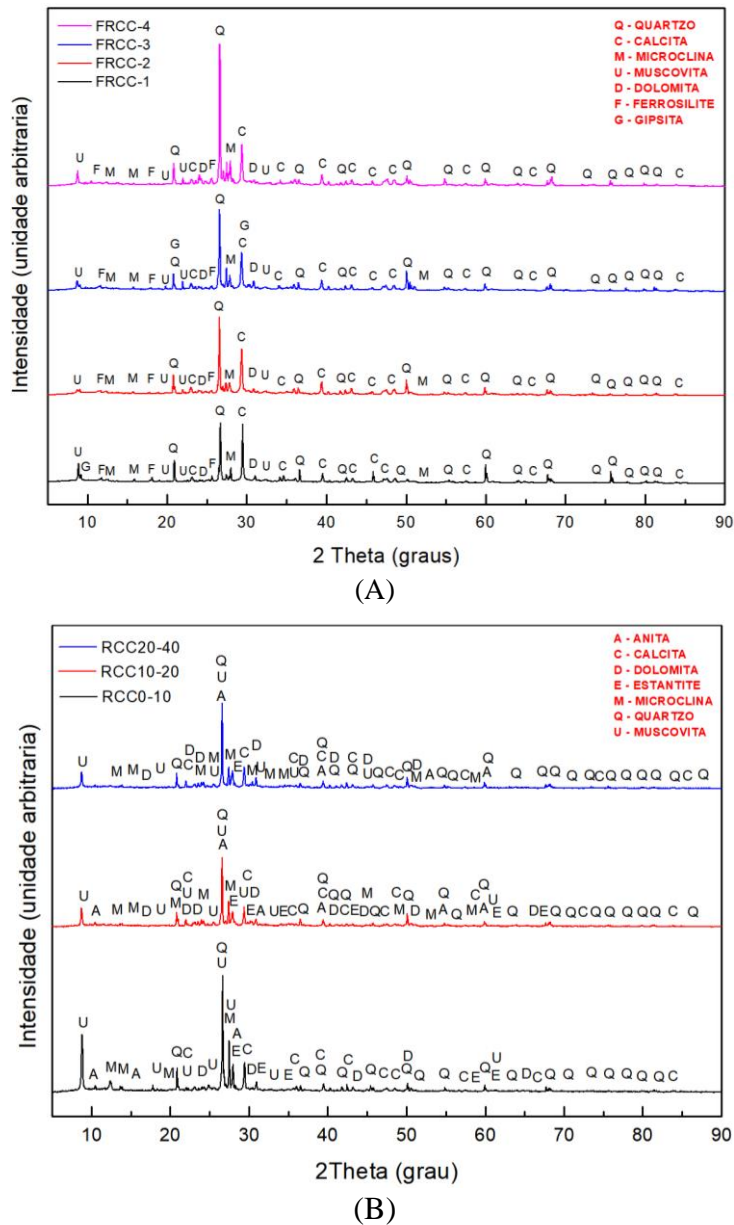


Figura 4 – Difratomogramas dos (A) FRCC1, FRCC2, FRCC3 e FRCC4 e (B) FRCC₀₋₁₀, FRCC₁₀₋₂₀ e FRCC₂₀₋₄₀, obtidos por DRX

Embora heterogêneos, os diversos lotes de FRCC utilizados possuem fases cristalinas semelhantes, com variações na proporção. Entre estas destacam-se, principalmente, quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3), microclina (KAlSi_3O_8) e muscovita ($\text{Al}_3\text{KSi}_3\text{O}_{12}$) em maiores proporções, além da presença minoritária das fases ferrosilite (FeSiO_3), dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] e gipsita [$\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$].

As fases cristalinas identificadas nas amostras de FRCC₀₋₁₀, FRCC₁₀₋₂₀ e FRCC₂₀₋₄₀ são semelhantes às observadas nos lotes de FRCC, com exceção do ferrosilite e gipsita que não foram detectadas e incluindo-se as fases anita [$\text{KFe}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$] e estantita (MgSiO_3).

Composição mineralógica potencial (Método de Bogue)

A partir da análise da composição química e mineralógica dos FRCC e das matérias-primas tradicionais (argila e calcário), foram estimadas as composições mineralógicas potenciais dos clínqueres que pudessem utilizar os diferentes tipos de FRCC como matérias-primas, com base em suas fases principais (C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF), calculadas pelo método de Bogue [15], e que estão apresentadas na Tabela III. É possível verificar que, teoricamente, todos os clínqueres formariam a fase alita em teores superiores a 65%, teor suficiente para classificá-los como clínquer Portland (50 a 70% de alita) [18].

Tabela III – Composições mineralógicas potenciais dos clínqueres, obtidas segundo método de Bogue.

Denominação do Clínquer	Teores de Fases Estimadas (%)			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
REF	66,88	11,72	14,15	7,25
FRCC1	69,29	10,65	12,05	8,01
FRCC2	65,58	11,01	12,70	7,71
FRCC3	69,38	10,57	12,26	7,79
FRCC4	68,95	10,86	12,57	7,62
FRCC ₀₋₁₀	67,57	11,31	13,48	7,56
FRCC ₁₀₋₂₀	69,16	10,89	12,49	7,49
FRCC ₂₀₋₄₀	68,95	10,91	12,61	7,53

Embora este seja um método indireto de determinação da composição mineralógica do clínquer, com base na análise química elementar, ele é muito usual em cimenteiras para o acompanhamento rotineiro da produção de cimento, e indica que os resíduos poderão cumprir de forma satisfatória a função de substituição de parte da mistura calcário-argila.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho, pode-se concluir que:

- As características químicas e mineralógicas dos resíduos avaliados são compatíveis com as observadas nas matérias-primas utilizadas na produção de cimento, servindo de fonte alternativa dos principais elementos químicos essenciais para a produção do clínquer Portland, (cálcio, silício, alumínio e ferro), apresentando, ainda, outros elementos minoritários que podem auxiliar na formação das principais fases do cimento Portland, tais como magnésio, potássio, titânio e enxofre;

- O RCC possui características químicas e mineralógicas adequadas para sua utilização como matéria-prima alternativa de substituição de parte da mistura argila-calcário, na composição do clínquer Portland, possibilitando menores emissão de CO_2 e exploração de recursos naturais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESB, ao PPEC, à UFRB, à UVRG e à cimenteira pela doação dos materiais e as instituições onde os ensaios foram realizados: LEDMa/UFBA, IFBA e UEFS.

REFERÊNCIAS

- [1] ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2019.
- [2] CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Diretrizes e procedimentos para gestão dos resíduos de construção. Brasília, 2002.
- [3] BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010: institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010.
- [4] World Energy Outlook. International Energy Agency. p. 3313-344, 2014.
- [5] G. Habert; N. Roussel. Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. Cement and Concrete Composites, v. 31, p.397-402, 2009.
- [6] WBCSD. Cement Sustainability Initiative: Progress Report. Atar Roto Presse SA, Switzerland, 2012. Disponível em: <<http://www.wbcd.org>>. Acesso em: 5 mar. 2019.
- [7] ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 64 p, 2019.
- [8] UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. Acordo de Paris. 2016. Disponível em: <http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php>. Acesso em: 11 jul. 2017.
- [9] F. Puertas et al. Residuos cerámicos para suposible uso como materia prima em la fabricación de clínker de cemento Portland: caracterización y activación alcalina. Materiales de Construcción. V. 56, 281, 73-84, 2006.
- [10] C.T. Galbenis; S. Tsimas. Use of construction and demolition wastes as raw materials in cement clinker production. China Particuology. V. 4, No. 2, 83-85, 2006.
- [11] F. Puertas et al. Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production. Cement and Concrete Composites. V. 30, 798–805, 2008.
- [12] J. Schoon et al. Waste fibrecement: An interesting alternative raw material for a sustainable Portland clinker production. Construction and Building Materials, V. 36, p. 391-403, 2012.
- [13] Odebrecht Ambiental. Processamento de RCC: pesquisa e desenvolvimento para produção de agregado reciclado. Catálogo comercial, 2015.
- [14] G. A. O. Silva. Avaliação da durabilidade de concretos contendo agregados reciclados de resíduos de construção civil (RCC). Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPEC. Universidade Federal da Bahia, 2017.
- [15] R. H. Bogue. Calculation of the Compounds in Portland Cement. Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition, v. 1, n. 4, p. 192-197, 1929.
- [16] N. B. Winter. Understanding Cement: An introduction to cement production, cement hydration and deleterious process in concrete. WHD Microanalyses Consultants. Rendlesham, Woodbridge, UK, 2012.
- [17] S. L. Centurione. Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland. 1993. 155f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1993.
- [18] H. F. W. Taylor. Cement Chemistry. 2.ed. London: Thomas Telford, 1997. 476p.