

## **Efeito da temperatura de clínquerização na formação de fases do clínquer Portland com incorporação de resíduo de construção civil (RCC)**

**(Effect of clinker temperature on the formation of Portland clinker phases with incorporation of construction waste)**

F. N. COSTA<sup>1\*</sup>; D. V. RIBEIRO<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>UFBA – Universidade Federal da Bahia – verasribeiro@hotmail.com

Rua Aristides Novis, 02. Federação. 40210-630. Salvador /BA

\*fernandacosta@ufrb.edu.br

### **Resumo**

*O cimento é um ligante hidráulico resultante da moagem do clínquer oriundo da calcinação de calcário e argila, numa temperatura de aproximadamente 1450°C. Seu processo de produção impacta o meio ambiente em quase todas as etapas, sendo o setor responsável por cerca de 5% da emissão mundial de CO<sub>2</sub> e o terceiro maior consumidor de energia. Este trabalho avaliou a formação de fases no clínquer produzido em temperatura usual (1450°C), comparando-o com clínqueres produzidos em temperaturas inferiores (1340°C e 1400°C), utilizando resíduo de construção civil, em substituição parcial à mistura calcário-argila. O resíduo é rico em silício, cálcio, alumínio e ferro, além de elementos mineralizantes em menor proporção, que possibilitam a diminuição da temperatura de formação das fases dos clínqueres. Para o clínquer produzido a 1400°C, observou-se a formação das principais fases, em teores satisfatórios, o que representa uma considerável redução no consumo de energia e na geração de CO<sub>2</sub>*

*Palavras chave: clínquer Portland, resíduo de construção civil, processamento, clínquerização, emissão de CO<sub>2</sub>*

### **Abstract**

*The cement is a hydraulic binder resulting from the grinding of clinker from calcination of limestone and clay at a temperature of approximately 1450 ° C. Its production process impacts the environment in almost all stages, with the sector accounting for about 5% of the world's CO<sub>2</sub> emissions and the third largest consumer of energy. This work evaluated the formation of phases in the clinker produced at usual temperature (1450°C), comparing it with clinkers produced at lower temperatures (1340°C and 1400°C), using construction waste, in partial replacement with the limestone-clay mixture. The residue is rich in silicon, calcium, aluminum and iron, in addition to mineralizing elements in a smaller proportion, which allow the decrease of the formation temperature of the clinker phases. For clinker produced at 1400°C, the formation of the main phases was observed, at satisfactory levels, which represents a considerable reduction in energy consumption and in the generation of CO<sub>2</sub>*

*Keywords: Portland clinker, construction waste, processing, clinker, sintering, CO<sub>2</sub> emission*

## INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um ligante hidráulico resultante da moagem do clínquer Portland, produto da calcinação de uma mistura de calcário e argila, num forno rotativo, com temperatura de cerca de 1450°C, e com adição de sulfato de cálcio para regular o tempo de início de hidratação dos componentes do cimento [1, 2].

A produção de cimento no Brasil foi de cerca de 71 milhões de toneladas em 2015, com uma redução para 21 milhões de toneladas em 2018, após uma longa crise econômica, [3, 4]. Com um importante papel no desenvolvimento do país, a indústria do cimento gera impactos socioambientais, além de impactos gerados na fase de clínquerização, a partir da emissão de gases prejudiciais. O setor é responsável por cerca de 5% da emissão mundial do gás carbônico [5,6], com consequências diretas nas mudanças climáticas, no aquecimento global e no aumento do nível do mar, e está entre os maiores consumidores de energia do mundo, ocupando a terceira colocação [7].

Durante a produção do clínquer, os impactos gerados pela indústria cimenteira estão associados às principais reações químicas que ocorrem no forno, com a decomposição de carbonato de cálcio em óxido de cálcio ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ), que causa o aumento da emissão de  $\text{CO}_2$ , além da queima de combustíveis fósseis para o aquecimento dos fornos.

Outro grande efeito colateral do desenvolvimento urbano e industrial é a geração de resíduos. Dados da ABRELPE apontam que os municípios brasileiros coletaram nos logradouros públicos cerca de 45 milhões de toneladas de resíduos de construção civil (RCC) em 2016, correspondendo a cerca de 60% de todo o resíduo sólido urbano (RSU) gerado [8].

A utilização de diferentes resíduos e subprodutos industriais como materiais alternativos na fabricação de cimento tem-se revelado um meio eficaz de alcançar a minimização de impactos ambientais. Seguindo esta linha, pesquisas têm sido realizadas pela substituição parcial de matérias-primas e/ou pela incorporação de adições ao cimento [9, 10, 11].

O resíduo de construção civil é uma fonte alternativa dos principais elementos químicos do clínquer ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), sendo uma rica e importante fonte de cálcio, permitindo introduzir  $\text{CaO}$  na formulação da farinha, substituindo parcialmente as matérias-primas usuais e, assim, reduzindo as emissões de  $\text{CO}_2$  durante a clínquerização.

Diante dessa problemática, este trabalho estuda o efeito da temperatura de clínquerização na formação de fases do clínquer Portland com incorporação de RCC, em substituição parcial à mistura calcário-argila, avaliando clínqueres produzidos em temperatura usual (1450°C), comparando-o com clínqueres produzidos em duas temperaturas inferiores (1340°C e 1400°C).

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nessa pesquisa foram amostras de RCC classe A [12], provenientes da Unidade de Valorização de Resíduos Grajaú S.A. (UVRG), da cidade de São Paulo. 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 de uma primeira etapa do processo de beneficiamento, separados das demais frações por ação de um ciclone, chamados nessa pesquisa de FRCC1 e FRCC4;

b) Finos de resíduo de construção civil (FRCC) provenientes da britagem em laboratório de outras frações do RCC, chamados nessa pesquisa de FRCC<sub>0-10</sub>, FRCC<sub>10-20</sub> e FRCC<sub>20-40</sub>, formado a partir de grãos com diâmetro máximo entre 0 a 10 mm, entre 10 a 20 mm e entre 20 a 40 mm, respectivamente.

Os resíduos foram triturados num moinho de mandíbulas e, posteriormente, num moinho horizontal de bolas cerâmicas, sendo o material final passado em peneira com abertura de malha igual a 75 µm. Além de amostras de RCC, foram utilizadas amostras de calcário e argila, disponibilizadas por uma cimenteira localizada no Estado de Sergipe, que, também, foram moídas até ficarem com partículas inferiores a 75 µm.

As matérias-primas foram caracterizadas física, química e mineralogicamente e, a partir destes resultados, foram realizadas as dosagens das farinhas de clínquer, buscando incorporar o RCC, substituindo toda a argila e parte do calcário. Adicionalmente, foi dosado um clínquer com as matérias-primas tradicionais, sem RCC, a ser utilizado como referência.

Após a dosagem das farinhas, utilizando os módulos químicos (Fator de Saturação de Cal-FSC, Módulo de Alumina-MA e Módulo de Sílica-MS) [13], os clínqueres experimentais foram produzidos. Foi adotado o valor de FSC 98, como em diversas pesquisas recentes [14, 15, 16], buscando-se a obtenção de clínqueres com maior teor de alita e menores teores de cal livre.

Foram moldadas amostras em formato esférico (*pellets*), de aproximadamente 1 cm de diâmetro e com adição de cerca de 20% (em massa) de água, a fim de facilitar a moldagem destas esferas. Os *pellets* foram secos em estufa a  $100 \pm 5^\circ\text{C}$  e colocados em cadinhos de alumina, sendo levados para queima, seguida de resfriamento brusco, para manter suas fases mineralógicas e garantir as propriedades desejadas, resultando, assim, no clínquer. A fim de avaliar a influência da temperatura durante a produção dos clínqueres, foram utilizadas três diferentes configurações de queima ( $1340^\circ\text{C}$ ,  $1400^\circ\text{C}$  e  $1450^\circ\text{C}$ ), num forno laboratorial modelo LHT 02/17 LB, da marca Nabertherm.

Para a avaliação dos clínqueres experimentais, foi feita a identificação da composição mineralógica 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 Å) de 30 kV e 10 mA, sem sistema de filtragem com monocromador secundário. Os espectros de difração foram obtidos na faixa de  $2\theta$  de 5° a 90°, modo contínuo a 0,02°/s.

As fases cristalinas presentes nas amostras foram identificadas com auxílio do *software DIFFRAC plus - EVA*, com base de dados no sistema COD (*Crystallography Open Database*) e quantificadas com o *software TOPAS Acadêmico versão 4.2*, que se baseia no método de *Rietveld* e sistema CIF (*Crystallography Information File*).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização química das matérias-primas

As composições químicas dos diferentes lotes de FRCC, da argila e do calcário são apresentadas na Tabela I. 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.

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

Material	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	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 4	38,41	20,23	10,68	4,12	2,81	1,42	1,57	2,13	0,72	0,61	17,30
FRCC <sub>0-10</sub>	37,30	16,46	13,15	4,30	2,69	2,13	0,79	0,96	0,75	0,58	20,90
FRCC <sub>10-20</sub>	45,12	16,46	11,83	4,19	3,45	3,21	2,04	0,81	0,65	0,75	11,50
FRCC <sub>20-40</sub>	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

Entre as matérias-primas alternativas como substituto parcial do calcário, principal fonte de cálcio da farinha, o FRCC1 apresenta-se como a maior fonte de óxido de cálcio (26,7%), seguido pelo FRCC4 (20,2%). A maior fonte de sílica alternativa à argila é o FRCC<sub>10-20</sub> (45,1%), seguida pelo FRCC<sub>20-40</sub> (42,4%). Dessa forma, percebe-se que os FRCC são fontes alternativas de cálcio e silício, podendo, quimicamente, substituir parte do sistema argila-calcário, matérias-primas tradicionais usadas na produção do cimento Portland.

## Dosagem e produção dos clínques Portland contendo FRCC

A Tabela II apresenta as porcentagens de cada matéria-prima utilizada para a fabricação dos clínques com a incorporação dos cinco tipos de RCC e do clínquer de referência (produzido com calcário e argila). Observa-se que foi possível a substituição total da argila por FRCC, em todos os clínques experimentais, incorporando à mistura cerca de 9 a 14% de FRCC na farinha crua.

Tabela II – Percentual, em massa, de cada matéria-prima na composição das farinhas precursoras para produção dos clínques experimentais, com FSC fixado em 98% e parâmetros químicos resultantes.

Materiais	Denominação dos clínques / porcentagem em massa (%)					
	FSC – REF	FSC - FRCC1	FSC – FRCC4	FSC - FRCC <sub>0-10</sub>	FSC - FRCC <sub>10-20</sub>	FSC - FRCC <sub>20-40</sub>
Calcário (%)	93,20	85,71	89,53	90,14	90,90	90,50
Argila (%)	6,80	-	-	-	-	-
FRCC (%)	-	14,29	10,47	9,86	9,10	9,50
Parâmetros químicos						
FSC (%)	98	98	98	98	98	98
MS	2,35	2,36	2,52	2,50	2,50	2,47
MA	2,88	2,63	2,56	2,58	2,45	2,52

Como os FRCC são fonte alternativa dos principais elementos químicos do clínquer (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), sendo uma rica e importante fonte de CaO, com quantidades que variam de 17 a 27% na sua composição química, a incorporação de RCC possibilitou a diminuição de cerca de 8% de calcário na farinha.

## Caracterização dos clínques Portland contendo FRCC

Os diferentes clínques foram avaliados quanto à composição mineralógica a fim de se verificar a formação das fases cristalinas esperadas (C<sub>3</sub>S: Silicato tricálcico - 3CaO.SiO<sub>2</sub>; C<sub>2</sub>S: Silicato dicálcico - 2CaO.SiO<sub>2</sub>; C<sub>3</sub>A: Aluminato tricálcico - 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; e C<sub>4</sub>AF: Ferroaluminato tetracálcico - 4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Os difratogramas dos clínques calcinados a 1340°C são apresentados na Figura 2 e a quantificação das fases identificadas é apresentada na Tabela III. Verificou-se a formação das principais fases do clínquer, apesar de a temperatura ser menor que a usualmente praticada na produção industrial, que é de 1450°C.

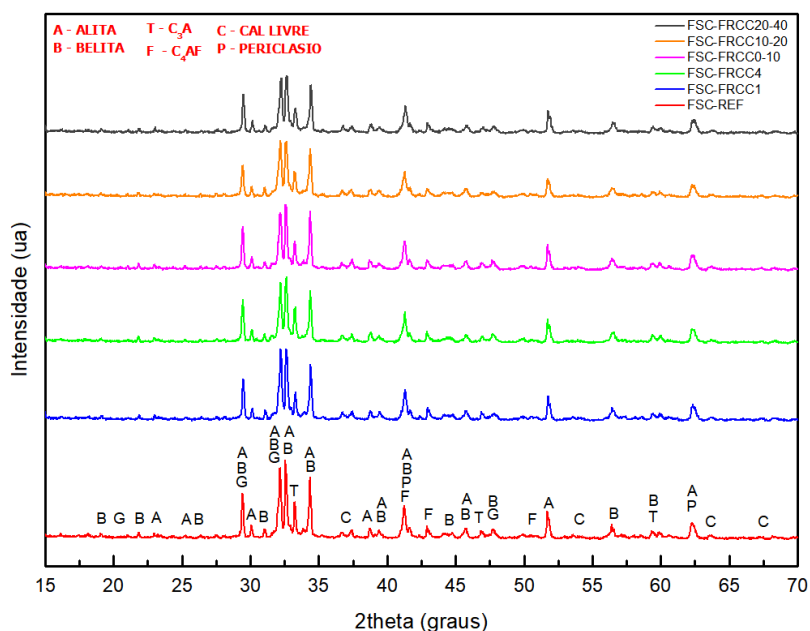


Figura 2 – Análise mineralógica dos clínques de referência e contendo diferentes tipos de FRCC, calcinados à 1340°C.

Tabela III – Teores de fases cristalinas dos clínques experimentais calcinados à 1340°C, obtidos por meio do método de Rietveld.

Clínquer	Teor de Fases (%)							Indicadores*		
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A cúbico	C <sub>3</sub> A ortorr.	C <sub>4</sub> AF	CaO	MgO	GOF	R <sub>exp</sub>	R <sub>wp</sub>
FSC-REF	54,97	32,71	8,74		0,84	0,19	2,55	1,29	7,72	9,99
FSC-FRCC1	50,25	34,97	7,05		4,02	0,46	3,25	1,19	7,87	9,34
FSC-FRCC4	57,75	27,95	10,63		0,54	0,39	2,74	1,23	7,89	9,68
FSC-RCC <sub>0-10</sub>	57,93	28,46	8,86		0,87	0,93	2,95	1,27	7,93	10,06
FSC-RCC <sub>10-20</sub>	57,14	31,96	7,48		0,67	0,29	2,46	1,21	8,21	9,93
FSC-RCC <sub>20-40</sub>	57,26	30,38	8,81		0,53	0,37	2,65	1,25	8,19	10,21

\*Indicadores estatísticos que fornecem os resíduos entre os pontos experimentais e os calculados: GOF = *goodness of fit*; R<sub>exp</sub> = *expected R fator* e R<sub>WP</sub> = *weighted profile R fator*.

A partir dos resultados apresentados na Tabela III, percebe-se que a fase alita está presente em maior quantidade em todos os clínques dosados com incorporação do RCC, indicando que os resíduos substituíram adequadamente parte do sistema calcário-argila. É recomendável que esta fase seja o constituinte majoritário do clínquer, pois, é a partir de sua hidratação que são formados os silicatos hidratados, conferindo ao cimento Portland parcela significativa de sua resistência mecânica [13]. Observa-se que entre os clínques estudados, o que continha o

FRCC<sub>0-10</sub> apresentou o maior teor de alita (57,9%), tendo, inclusive, desempenho superior ao clínquer de referência (54,9%).

A formação do C<sub>3</sub>S (alita) no forno começa a partir de 1400°C, seguindo lentamente até 1500°C. Entretanto, a presença de alumina e óxido de ferro nos constituintes das matérias-primas para a produção do clínquer acelera a formação do C<sub>3</sub>S, antecipando a sua formação por volta de 1300°C, em consequência da fase líquida existente com a fusão das fases C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF [13]. Por isso, mesmo na temperatura de clínquerização de 1340°C, ocorre a formação de alita.

Todos os clínqueres experimentais, independentemente do tipo de RCC utilizado, apresentaram a fase alita em teores superiores ao necessário para classificá-los como clínquer Portland, entre 50 a 70%, de acordo com TAYLOR [13]. No entanto, todos os clínqueres apresentam teores elevados da fase belita (C<sub>2</sub>S), o que pode ter acontecido em função da temperatura de queima ter sido insuficiente (1340°C), já que a fase alita (C<sub>3</sub>S) começa a se formar em temperatura superior a 1200°C, a partir do C<sub>2</sub>S previamente formado [2].

A Figura 3 e a Tabela IV apresentam os difratogramas dos clínqueres calcinados na temperatura de 1400°C e os resultados quantificação das fases cristalinas identificadas, respectivamente.

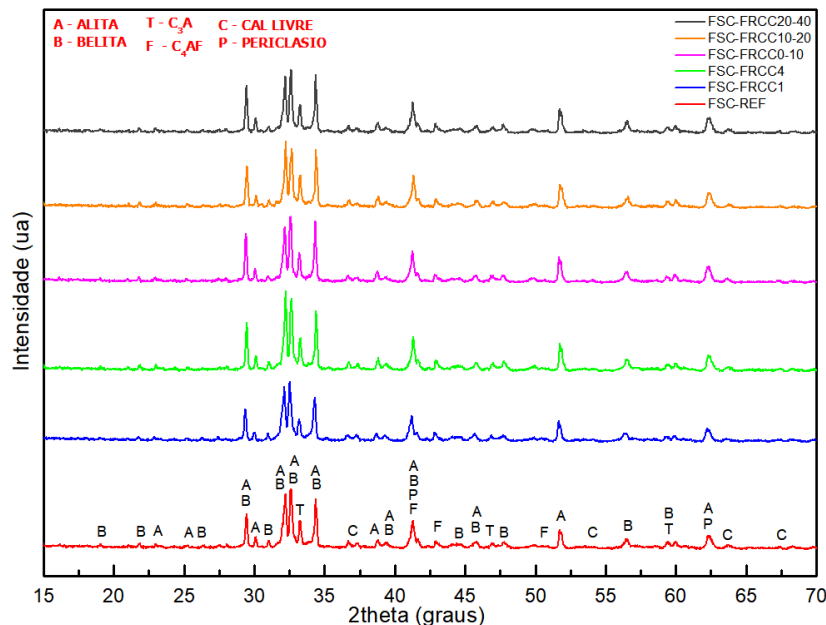


Figura 3 – Análise mineralógica dos clínqueres de referência e contendo diferentes tipos de FRCC, calcinados à 1400°C.

Percebe-se em todos os clínqueres produzidos a 1400°C uma redução no teor de belita (C<sub>2</sub>S), em relação aos clínqueres produzidos à temperatura de 1340°C, como já era esperado. Como consequência, a quantidade de alita (C<sub>3</sub>S) formada aumenta, atingindo valores de até

65,9% no clínquer FSC-FRCC4, uma vez que 1400°C é uma temperatura de calcinação mais adequada, com maiores teores de belita reagindo com a cal livre e formando a alita.

Tabela IV – Teores de fases cristalinas nos clínqueres experimentais calcinados a 1400°C, obtidos por meio do método de Rietveld.

Clínquer	Teor de Fases (%)						Indicadores		
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaO	MgO	GOF	R <sub>exp</sub>	R <sub>wp</sub>
FSC-REF	61,07	27,00	8,17	1,59	0,06	2,11	1,18	8,23	9,69
FSC-FRCC1	60,73	29,37	6,16	1,13	0,07	2,54	1,18	8,29	9,82
FSC-FRCC4	65,87	23,03	7,74	0,98	0,06	2,32	1,26	7,81	9,86
FSC-RCC <sub>0-10</sub>	64,24	22,88	8,98	1,14	0,27	2,49	1,21	8,07	9,75
FSC-RCC <sub>10-20</sub>	60,52	23,84	8,53	3,26	0,87	2,98	1,20	8,15	9,76
FSC-RCC <sub>20-40</sub>	59,32	27,18	9,34	1,07	0,18	2,91	1,20	8,14	9,73

Pesquisas numa fábrica de cimento espanhola [17] concluíram que o aumento da temperatura de sinterização acima de 1400°C não leva à formação de um teor de C<sub>3</sub>S superior a 78%, afirmando que existe um limite de temperatura acima do qual não se formam maiores quantidades de alita, ou seja, quando a temperatura é reduzida em 50°C em relação à temperatura usual de 1450°C, as porcentagens de alita permanecem dentro do intervalo esperado (73 a 76%), com cerca de 1% de cal livre, o que supõe uma economia significativa de energia, mantendo a qualidade do clínquer.

A última temperatura de queima avaliada foi 1450°C, usualmente utilizada na indústria cimenteira. Os difratogramas dos clínqueres calcinados nessa temperatura são apresentados na Figura 4 e os resultados da avaliação quantitativa das fases estão dispostos na Tabela V.

Observa-se que os clínqueres produzidos a 1450°C apresentaram teores superiores de alita e inferiores de cal livre residual (CaO). Durante a calcinação das matérias-primas e fabricação do clínquer, até 1455°C, ocorre a formação de C<sub>3</sub>S a partir do C<sub>2</sub>S com quase extinção da cal livre [2].

Assim, apesar de se verificar a formação das fases desejadas a 1400°C, de forma satisfatória, os melhores resultados foram observados quando se produziu os clínqueres a 1450°C, temperatura convencionalmente utilizada na indústria, com teores de alita em torno de 73,19% para o clínquer FSC-FRCC<sub>20-40</sub>.



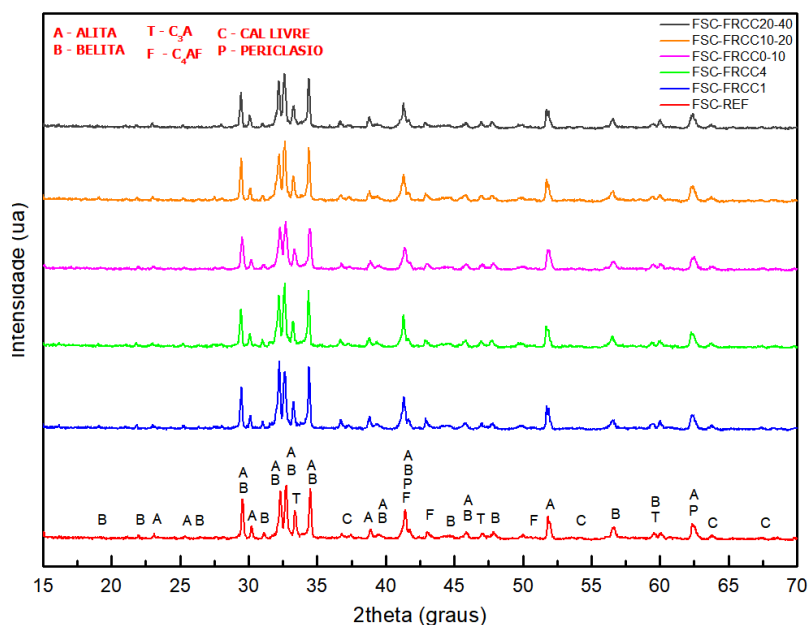


Figura 4 – Análise mineralógica dos clínques de referência e contendo diferentes tipos de FRCC, calcinados à 1450°C

Tabela V – Teores de fases cristalinas nos clínques experimentais calcinados a 1450°C, obtidos por meio do método de Rietveld.

Clínquer	Teor de Fases (%)						Indicadores		
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaO	MgO	GOF	R <sub>exp</sub>	R <sub>wp</sub>
FSC-REF	65,21	21,09	9,31	0,51	1,21	2,67	1,22	8,31	10,14
FSC-FRCC1	67,87	21,46	7,31	0,44	0,27	2,65	1,28	8,05	10,27
FSC-FRCC4	67,02	22,01	7,71	0,56	0,27	2,43	1,22	8,19	9,97
FSC-RCC <sub>0-10</sub>	66,62	21,01	9,24	0,38	0,11	2,64	1,18	8,46	10,01
FSC-RCC <sub>10-20</sub>	60,85	26,39	9,07	0,60	0,24	2,85	1,23	8,23	10,09
FSC-RCC <sub>20-40</sub>	73,19	15,78	8,48	0,46	0,07	2,02	1,20	8,37	10,03

## CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados neste trabalho, pode-se concluir que:

- O clínques contendo FRCC em substituição total à argila e parcial ao calcário apresentaram as principais fases cristalinas do clínquer (C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>S, C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF) em todas as temperaturas de clinquerização utilizadas (1340°C, 1400°C e 1450°C);

- A concentração da fase alita formada aumentou em função da temperatura de clinquerização, com uma conseqüente redução da fase belita;

- É possível produzir clínques calcinados à temperatura de 1400°C, de boa qualidade, com incorporação de RCC, devido à presença de elementos mineralizantes (alumínio, ferro, enxofre e titânio), não interferindo negativamente na formação de fases mineralógicas do

clínquer Portland, proporcionando uma possível redução no consumo de energia e na geração de CO<sub>2</sub>.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESB, ao PPEC, à Usina de Valorização de Resíduos Grajaú e à cimenteira, pela doação dos materiais, e as instituições onde os ensaios foram realizados: Laboratório de Ensaio de Durabilidade dos Materiais/UFBA e Instituto Federal de Educação.

## REFERÊNCIAS

- [1] Y. Kihara, Estudo mineralógico de clínquer de cimento Portland. 1973. 72f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1973.
- [2] N. B. Winter. Understanding Cement: An introduction to cement production, cement hydration and deleterious process in concrete. WHD Microanalyses Consultants Ltd. Rendlesham, Woodbridge, UK, 2012.
- [3] Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Cimento: Consumo, Produção e Valores de Materiais de Construção. Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br/menu/materiais-de-construcao/cimento>>. Acesso em: 11 abril 2019.
- [4] Sindicato nacional da indústria do cimento. Números: dados do setor. 2019. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>>. Acesso em: 30 mar. 2019.
- [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] WORLD Energy Outlook. International Energy Agency. p. 3313-344, 2014.
- [8] ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017. Disponível em: <[http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama\\_abrelpe\\_2017.pdf](http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf)>. Acesso em: 15 fev. 2019.
- [9] F. Puertas et al. Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production. Cement and Concrete Composites. Vol. 30, 798–805, 2008.
- [10] J. Schoon et al. Fines extracted from recycled concrete as alternative raw material for Portland cement clinker production. Cement and Concrete Composites, V.58, p. 70–80, 2015.
- [11] B. B. MARIANI et al. Utilization of waste from TiO<sub>2</sub> production for Portland cements obtention. In: 7th International Congress on Ceramics, 2018, Foz do Iguaçu. Proceedings of 7th International Congress on Ceramics, 2018. v. 7. p. 194-194.
- [12] CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n° 307. Diretrizes e procedimentos para gestão dos resíduos de construção. Brasília, 2002.
- [13] H. F. W. Taylor. Cement Chemistry. 2.ed. London: Thomas Telford, 1997. 476p.
- [14] 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.
- [15] N. H. Rodríguez et al. The effect of using thermally dried sewage sludge as an alternative fuel on Portland cement clinker production. Journal of Cleaner Production, V. 52, N° 1, p. 94-102, 2013.
- [16] A. S. G. Vilaplana et al. Utilization of Ladle Furnace slag from a steelwork for laboratory scale production of Portland cement. Construction and Building Materials, V. 94, N° 30, p. 837-843, 2015.
- [17] A. M. Castañón et al. Energy and environmental savings via optimization of the production process at Spanish cement factory. Journal of Cleaner Production. V. 98, p. 47-52, 2015.