PRODUÇÃO DE CLÍNQUER PORTLAND COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL: INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO *PELLET* NA FORMAÇÃO DAS FASES MINERALÓGICAS

F. N. COSTA[1]; C. M. R. DIAS[2]; D. V. RIBEIRO[3]

(1) PPEC – Programa de Pós-Graduação em Eng. Civil da Universidade Federal da Bahia - fernandacosta@ufrb.edu.br; (2) Universidade Federal da Bahia – clebermrd@gmail.com; (3) Universidade Federal da Bahia – verasribeiro@hotmail.com

RESUMO

Nos últimos anos intensificaram-se os esforços para a redução das emissões de gases do efeito estufa no contexto do desenvolvimento sustentável, com pesquisas na produção de novos materiais e ligantes para a construção. Esse artigo analisou a influência da geometria dos *pellets* na produção dos clínqueres com a incorporação de resíduo de construção civil (RCC). Foram adotados procedimentos adaptados da metodologia proposta pela ABCP e adotada em estudos de clínqueres laboratoriais, na tentativa de simular etapas do processo industrial. *Pellets* foram preparados com a mesma formulação, porém com três diferentes geometrias: esférico com diâmetro de 1 cm e 2 cm, com moldagem manual, e semi-esférico com diâmetro de 2 cm empregando-se moldes de PLA (ácido polilático) impressos em impressora 3D. Os clínqueres foram caracterizados utilizando-se a técnica de difração de raios X (DRX) e o método de Rietveld foi empregado na quantificação das fases. Observaram-se variações nas quantidades das fases alita e belita com a geometria, embora utilizadas as mesmas condições de calcinação, provavelmente devido à variação da área superficial, o que possibilitou diferenças na área de exposição e provocou gradientes da taxa de resfriamento. Verificou-se que o uso de molde padroniza e facilita a moldagem dos clínqueres.

Palavras-chave: RCC, *pellets* esféricos, *pellets* semi-esféricos, molde impresso em 3D, procedimento de produção.

Portland clinker production with residue of civil construction: influence of pellet geometry in the formation of mineralogic phases

ABSTRACT

In recent years efforts have been intensified to reduce greenhouse gas emissions in the context of sustainable development, with research into the production of new materials and building binders. This paper analyzed the influence of pellet geometry on the production of clinkers with the incorporation of construction waste (RCC). Procedures were adopted adapted from the methodology proposed by the ABCP and adopted in laboratory clinker studies, in an attempt to simulate stages of the industrial process. Pellets were prepared with the same formulation, but with three different geometries: spherical with a diameter of 1 cm and 2 cm, with manual molding, and a semi-sphere with a diameter of 2 cm, using PLA (polylactic acid) molds printed on a printer 3D. The clinkers were characterized using the X-ray diffraction (XRD) technique and the Rietveld method was used in the quantification of the phases. Variations in the hatrurite and larnite phases were observed with the geometry, although the same calcination conditions were used, probably due to the variation of the surface area, which allowed differences in the area of exposure and caused gradients of the cooling rate. It has been verified that the use of mold standardizes and facilitates the molding of clinkers

Key-words: RCC, spherical pellets, semi-spherical pellets, 3D printed mold, production procedure.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, intensificaram-se os esforços para reduzir emissões de gases do efeito estufa [1] e minimizar a exploração de recursos naturais no contexto do desenvolvimento sustentável, com pesquisas na produção de novos materiais e ligantes para a construção. A reutilização de resíduos sólidos urbanos (RSU) e subprodutos industriais tem se mostrado como uma alternativa muito atrativa, devido aos benefícios ambientais da reutilização, em resposta à prática de disposição inadequada desses rejeitos. No Brasil, em 2017, cerca de 42,3 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, 59,1% do total coletado, foram dispostos em aterros sanitários [2]. O restante, 40,9%, foi despejado em locais inadequados, como lixões ou aterros controlados, com elevado potencial de poluição ambiental e impactos negativos à saúde [2].

Os resíduos de construção civil (RCC), que representam cerca de 60% dos RSU [2], oferecem muitas oportunidades para sua reutilização em substituição aos agregados naturais [3-6]. Numa outra perspectiva, esses resíduos têm sido testados na fabricação de cimentos, substituindo parte da matéria-prima convencional (calcário e argila) do clínquer Portland [7-10] ou sendo utilizados como adição substituindo parte do clínquer na composição final do cimento [11].

O desenvolvimento dos estudos em clínqueres envolve um método experimental que já foi adotado em diversos trabalhos, na tentativa de simular o processamento industrial [12-15]. Entre esses procedimentos, está a configuração da geometria dos *pellets* para produzir os clínqueres: i) *pellets* esféricos moldados manualmente com diâmetro aproximado de 2 cm [15]; ii) *pellet* conformado em molde semi-elipsoidal com 1,2 gramas em média [16]; iii) *pellets* com dimensões 50 × 50 × 15 mm conformados usando uma prensa hidráulica de 10 toneladas [17].

A ausência de estudos evidenciando que as características geométricas do *pellet* exercem influência na formação das fases cristalinas do clínquer, uma vez que a variação da área superficial, isto é, a área de exposição, influencia na calcinação e no posterior gradiente de resfriamento, foi o motivador para essa pesquisa.

Neste sentido, esse artigo analisou a influência da geometria dos *pellets* na produção dos clínqueres Portland com incorporação de RCC, na formação de fases cristalinas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Foram utilizadas amostras de calcário e argila, disponibilizadas por uma cimenteira localizada no Estado de Sergipe, e amostras de RCC classe A [18] provenientes da Unidade de Valorização de Resíduos Grajaú S.A. (UVRG), localizada na Região Metropolitana de São Paulo.

Ao receber o material das obras, é realizada uma pré-triagem na UVRG, com a finalidade de remover materiais indesejados, como metais, gesso, papel e outros materiais de dimensões próximas ou superiores ao limite de alimentação da moega. Nesta etapa, são removidos, predominantemente, madeiras e materiais de grandes dimensões, sendo posteriormente acondicionados em caçambas Roll-on/Roll-off. Após a pré-triagem, o material é vertido em uma tremonha primária.

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, sendo uma com tamanho maior que 10 mm e outra menor que 10 mm, denominada escalpe, contendo predominantemente solo em sua composição. 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 do material por meio de um ciclone, levando-o até baias específicas de armazenamento.

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 dimensões inferiores 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 [5].

Nessa pesquisa foram utilizadas as frações finas do resíduo de construção civil (FRCC) da UVRG provenientes da moagem de grãos do RCC passantes nas peneiras com abertura de 40 mm e retidos na peneira com 20 mm de abertura.

2.2 Métodos

Foram recebidos quatro lotes diferentes do RCC que, após homogeneizados, tiveram amostras representativas selecionadas por meio de quarteamento, até obtenção da quantidade necessária para os estudos. As partículas foram cominuídas 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 consistiu no 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.

Os principais procedimentos adotados para produção dos clínqueres seguiram pesquisas anteriores [12-15], de acordo com metodologia proposta pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), para confecção e calcinação dos clínqueres laboratoriais, na tentativa de simular as etapas do processo de produção industrial, que envolve: moagem e homogeneização das matérias-primas, pré-calcinação da farinha, calcinação do clínquer e resfriamento brusco.

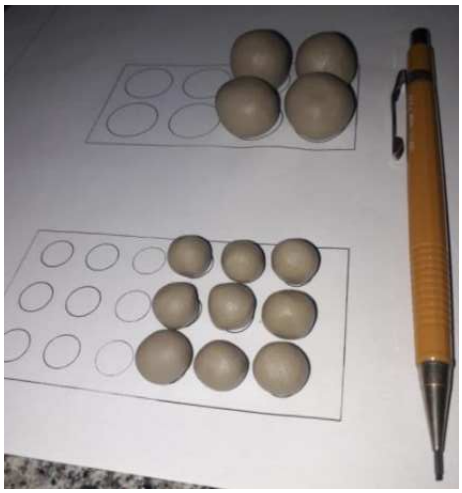
Inicialmente, foi realizada a caracterização física, química e mineralógica das matérias-primas e, a partir destes resultados, foram realizadas as dosagens das farinhas de clínquer, buscando incorporar o RCC, substituindo toda a argila e parte do calcário. Para ser utilizado como referência, foi dosado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

A dosagem das farinhas foi feita considerando os módulos químicos Fator de Saturação de Cal-FSC, Módulo de Alumina-MA e Módulo de Sílica-MS [19], sendo adotado o valor de FSC 98, conforme pesquisas recentes sobre o tema [17, 20, 21], buscando-se a obtenção de clínqueres com maior teor de alita e menores teores de cal livre.

Foram moldadas amostras em formato esférico (*pellets*), em três diferentes configurações, porém com a mesma dosagem das matérias-primas e com adição de 20% (em massa) de água, a fim de facilitar a moldagem destas esferas: a) *Pellet* esférico com 1 cm de diâmetro; b) *Pellet* esférico com 2 cm de diâmetro; c) *Pellet* semi-esférico com 2 cm de diâmetro.

Os *pellets* com diâmetro de 1 cm e de 2 cm foram moldados manualmente, utilizando como apoio um gabarito com as dimensões impressas numa folha de papel, conforme ilustrado na Figura 1. Para a moldagem dos *pellets* em semi-esfera de 2 cm de diâmetro foram utilizados moldes em filamento de PLA (ácido polilático) fabricados em impressora 3D, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 1 – *Pellets* moldados manualmente.



Fonte: Autores

Figura 2 - *Pellets* em molde de poliácido láctico.



Fonte: Autores

Os *pellets* foram secos em estufa a 100 ± 5°C e colocados em cadinhos de alumina, sendo levados para calcinação à 1450ºC num forno laboratorial modelo LHT 02/17 LB, da marca Nabertherm (Figura 3). Devido à presença de uma mesa de elevação motorizada, os clínqueres são expostos automaticamente ao resfriamento brusco, forçado, conforme ilustrado na Figura 4. Essa etapa é essencial para manter as fases mineralógicas e garantir as propriedades desejadas no clínquer experimental [22].

Figura 3 - Forno laboratorial utilizado, com temperatura máxima do equipamento de 1650ºC.



Fonte: Nabertherm (2019)

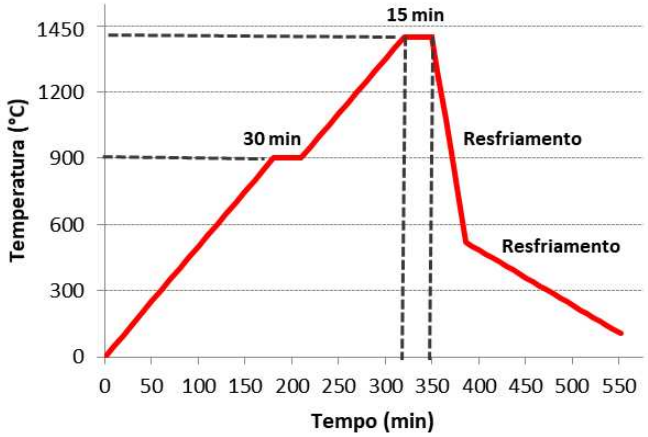
Figura 4 – Mesa de elevação com descida de clínqueres para resfriamento rápido.



Fonte: Autores

A rotina de calcinação dos *pellets* de clínquer está representada na Figura 5. Os *pelltes* foram submetidos a uma taxa de aquecimento de 5°C/min, até atingir a temperatura de 900°C, permanecendo nesta temperatura durante 30 minutos para a descarbonatação do calcário. Continuando a segunda etapa de queima, com a mesma taxa de aquecimento, as amostras permaneceram no forno até atingir a temperatura final de 1450ºC, permanecendo nesse patamar durante 15 minutos antes de finalizar a queima.

Figura 5 – Rotina de clinquerização no forno LHT 02/17 LB, da marca Nabertherm, até 1450ºC.



Fonte: Autores

Foram realizadas três moldagens e três queimas para cada tipo de clínquer, totalizando 18 clínqueres estudados.

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 Kα 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 2θ de 5° a 90°, varredura com incrementos de 0,02º e tempo de coleta de 0,2 segundos por passo.

As fases cristalinas presentes nos clínqueres 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*).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização química das matérias-primas

As composições químicas do FRCC, da argila e do calcário são apresentadas na Tabela 1. Observa-se que o resíduo de construção civil é rico em silício, cálcio, alumínio e ferro, além de outros elementos em menor proporção, como magnésio, enxofre, sódio, potássio e titânio.

Tabela 1 – Caracterização química, em óxidos, obtida por meio de FRX, para o FRCC, o calcário e a argila.

Material	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	Outros	PF*
FRCC	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

O FRCC apresenta-se como uma fonte de óxido de cálcio contendo 17,5% de CaO, servindo como matéria-prima alternativa ao calcário, principal fonte de cálcio da farinha na fabricação do clínquer.

O FRCC, também, pode ser utilizado como uma fonte de sílica alternativa à argila, pois, possui 42,4% de SiO_2. Dessa forma, percebe-se que esse FRCC é uma importante fonte alternativa de cálcio e silício, podendo substituir parte do sistema argila-calcário, matérias-primas tradicionais usadas na produção do cimento Portland.

3.2 Dosagem e produção dos clínqueres Portland contendo FRCC

A Tabela 2 apresenta as porcentagens de cada matéria-prima utilizada para a fabricação dos clínqueres experimentais com a incorporação do FRCC e do clínquer de referência (produzido com calcário e argila). Observa-se que foi possível a substituição total da argila por FRCC, incorporando à mistura cerca de 9,5% de FRCC na farinha crua.

Tabela 2 – Percentual, em massa, de cada matéria-prima na composição das farinhas precursoras para produção dos clínqueres experimentais, com FSC fixado em 98% e parâmetros químicos resultantes.

Denominação dos clínqueres	Materiais (%)			Parâmetros químicos		
	Calcário	Argila	FRCC	FSC (%)	MS	MA
REFERÊNCIA	93,20	6,80	-	98	2,35	2,88
FRCC	90,50	-	9,50	98	2,47	2,52

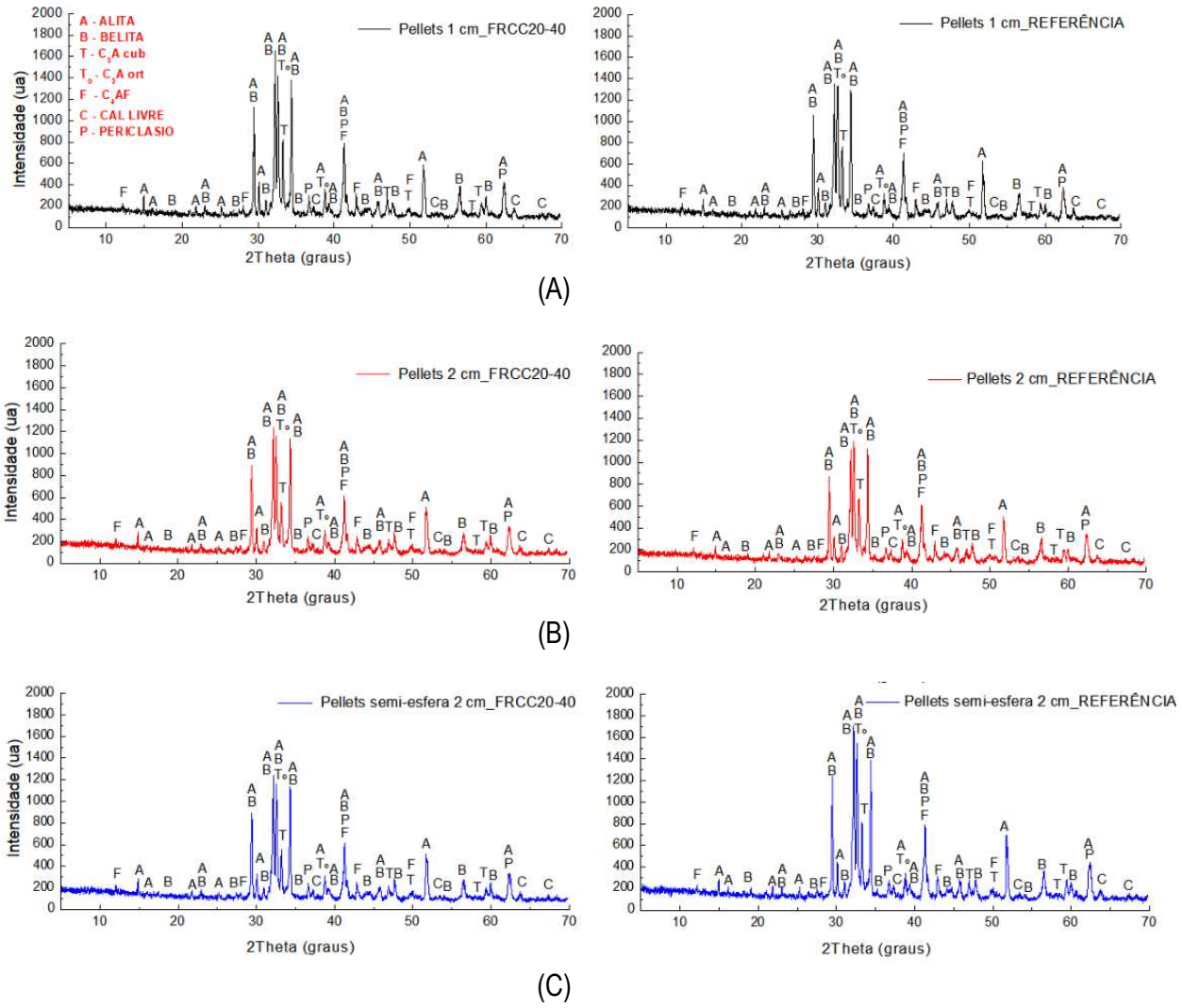
Como o FRCC é fonte alternativa dos principais elementos químicos do clínquer (CaO, SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3), sendo uma rica e importante fonte de CaO, a incorporação de RCC possibilitou a diminuição de cerca de 3% de calcário na farinha.

3.3 Avaliação dos clínqueres Portland nas três diferentes configurações de moldagem

Os clínqueres nas três diferentes configurações dos *pellets* foram avaliados quanto à composição mineralógica a fim de se verificar a formação das fases cristalinas esperadas (C_3S: Silicato tricálcico - $3CaO.SiO_2$; C_2S: Silicato dicálcico - $2CaO.SiO_2$; C_3A: Aluminato tricálcico - $3CaO.Al_2O_3$; e C_4AF: Ferroaluminato tetracálcico - $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$). Os difratogramas dos clínqueres de referência, produzidos com calcário e argila, e dos clínqueres com incorporação do RCC são apresentados na Figura 6.

Do ponto de vista mineralógico, na avaliação qualitativa, observa-se que todos os clínqueres produzidos com as três diferentes configurações dos *pellets* apresentaram as fases cristalinas esperadas por meio de picos desenvolvidos, principalmente de alita e belita, fases que devem ser majoritárias. Independente da configuração do *pellet*, as fases minoritárias do clínquer, C_3A e C_4AF, também foram formadas, como pode ser visto nos difratogramas.

Figura 6 - Análise mineralógica dos clínqueres de referência e contendo FRCC, produzidos com *pellets* de 1 cm (A), de 2 cm (B) e semi-esfera de 2 cm de diâmetro (C).



A quantificação das fases identificadas está apresentada nas Tabelas 3 e 4, onde se verifica que a fase alita está presente em maior quantidade em todos os clínqueres nas diferentes configurações, nos clínqueres de referência bem como nos clínqueres dosados com incorporação do RCC, indicando que os resíduos substituíram adequadamente parte do sistema calcário-argila. Para a produção de cimento Portland, a fase alita deve ser o constituinte majoritário do clínquer, uma vez que dentre os demais componentes do clínquer, esta fase é a que tem maior influência no endurecimento do cimento, sendo responsável pelo desenvolvimento das resistências mecânicas nas primeiras idades [23].

Tabela 3 – Teores de fases cristalinas dos clínqueres experimentais de referência, calcinados à 1450ºC, obtidos por meio do método de Rietveld.

Fases do clínquer	Referência Esfera de 1 cm					Referência Esfera de 2 cm					Referência Semi-Esfera de 2 cm				
	E1	E2	E3	M	DP	E1	E2	E3	M	DP	E1	E2	E3	M	DP
Alita	52,2	56,2	59,3	**55,9**	3,56	43,7	51,7	55,0	**50,1**	5,77	48,6	52,7	57,2	**52,8**	4,30
Belita	26,2	26,2	24,5	**25,6**	0,97	29,0	28,5	26,3	**27,9**	1,46	27,8	28,2	26,2	**27,4**	1,06
C_3A cúb	12,8	9,8	9,8	**10,8**	1,71	15,1	11,1	10,4	**12,2**	2,55	14,7	11,7	10,0	**12,1**	2,35
C_3A ort	2,0	1,1	0,8	**1,3**	0,63	1,1	2,0	1,5	**1,5**	0,48	3,3	1,2	0,6	**1,7**	1,41
C_4AF	3,6	3,5	3,0	**3,4**	0,30	8,4	3,9	4,1	**5,5**	2,58	2,7	3,2	3,0	**3,0**	0,23
Cal livre	0,2	0,3	0,1	**0,2**	0,10	0,2	0,1	0,2	**0,2**	0,09	0,2	0,4	0,1	**0,2**	0,15
Periclásio	2,7	2,8	2,5	**2,7**	0,14	2,6	2,8	2,7	**2,7**	0,09	2,7	2,7	2,9	**2,8**	0,14
GOF*	1,21	1,21	1,25	**1,22**	0,02	1,25	1,23	1,18	**1,22**	0,04	1,18	1,17	1,29	**1,21**	0,07

*Indicador estatístico que fornece a relação entre os resíduos esperados e os calculados: GOF (*goodnes of fit*) = R_{WP} (*weighted* profile R fator) / R_{exp} (*expected* R fator).
E1 a E3 = "esferas" de clínquer / M = média / DP = desvio padrão / C_3A cúb = C_3A cúbico / C_3A ort = / C_3A ortorrômbico.

Tabela 4 – Teores de fases cristalinas dos clínqueres experimentais com a incorporação de FRCC, calcinados à 1450ºC, obtidos por meio do método de Rietveld.

Fases do clínquer	$FRCC_{20-40}$ Esfera de 1 cm					$FRCC_{20-40}$ Esfera de 2 cm					$FRCC_{20-40}$ Semi-Esfera de 2 cm				
	E1	E2	E3	M	DP	E1	E2	E3	M	DP	E1	E2	E3	M	DP
Alita	61,6	59,1	61,0	**60,5**	1,27	54,5	58,3	56,6	**56,5**	1,87	55,8	57,7	58,3	**57,2**	1,29
Belita	22,2	24,4	21,7	**22,8**	1,46	26,1	23,6	24,5	**24,7**	1,29	24,4	23,8	23,7	**24,0**	0,41
C_3A cúb	9,6	8,9	9,3	**9,3**	0,36	10,7	10,1	9,1	**10,0**	0,80	11,4	11,8	11,7	**11,6**	0,21
C_3A ort	0,9	1,4	2,2	**1,5**	0,65	0,4	1,7	2,8	**1,6**	1,20	0,7	1,0	0,9	**0,9**	0,13
C_4AF	3,1	3,0	3,1	**3,0**	0,07	4,7	3,2	4,0	**3,9**	0,75	4,3	2,8	3,0	**3,3**	0,83
Cal livre	0,0	0,1	0,0	**0,0**	0,06	0,5	0,4	0,3	**0,4**	0,12	0,5	0,3	0,1	**0,3**	0,24
Periclásio	2,6	3,1	2,8	**2,8**	0,24	3,1	2,8	2,7	**2,8**	0,18	2,8	2,8	2,4	**2,7**	0,22
GOF	1,20	1,21	1,23	**1,21**	0,02	1,22	1,21	1,16	**1,20**	0,03	1,21	1,23	1,23	**1,22**	0,01

*Indicador estatístico que fornece a relação entre os resíduos esperados e os calculados: GOF (*goodnes of fit*) = R_{WP} (*weighted* profile R fator) / R_{exp} (*expected* R fator).
E1 a E3 = "esferas" de clínquer / M = média / DP = desvio padrão / C_3A cúb = C_3A cúbico / C_3A ort = / C_3A ortorrômbico.
$FRCC_{20-40}$ = Fino de Resíduo de Construção Civil formado a partir de grãos com diâmetro máximo entre 20 a 40 mm.

Entre as três configurações dos *pellets*, os clínqueres com esferas de 1 cm de diâmetro foram os que apresentaram o maior teor de alita, tanto nos clínqueres de referência como nos clínqueres com RCC. Em segundo lugar, o maior teor de alita foi observado nos clínqueres com *pellets* semi-esféricos com diâmetro de 2 cm.

Os clínqueres de referência produzidos com esferas de 1 cm de diâmetro apresentaram teor de alita em média 10,7% superior que os produzidos com esferas de 2 cm de diâmetro, e em média 5,8% superior ao dos clínqueres produzidos com semi-esfera de 2 cm de diâmetro.

Para os clínqueres com incorporação de RCC confeccionados com esferas de 1 cm de diâmetro a diferença média foi de 6,7% e 5,4% a mais de alita que os clínqueres esféricos de 2 cm de diâmetro e semi-esféricos de 2 cm de diâmetro, respectivamente.

A área superficial específica dos *pellets* com 1 cm de diâmetro é, em média, aproximadamente 2,57 cm^2/g, cerca de 1,4 vezes maior que a área superficial específica dos *pellets* com 2 cm de diâmetro (em média, 1,90 cm^2/g) e 1,1 vezes maior que a dos *pellets* semi-esféricos (em média 2,32 cm^2/g).

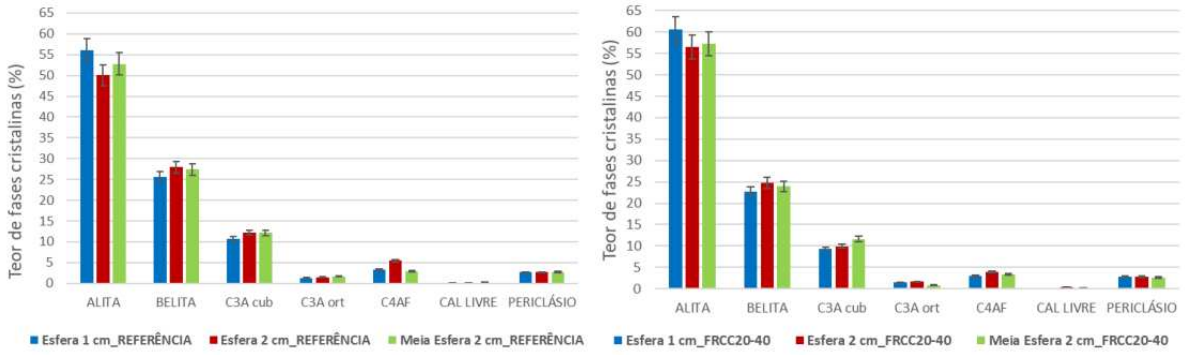
Já o volume médio dos *pellets* com 2 cm de diâmetro é de 3,495 cm^3, enquanto o volume dos *pellets* com 1 cm de diâmetro é de 0,529 cm^3, 6,6 vezes maior, o que resulta numa demanda maior de calor para as mesmas condições de calcinação.

Assim, nos *pellets* com 2 cm de diâmetro existe uma maior dificuldade de transferência de calor durante a clinquerização nas mesmas condições de queima quando comparados com os *pellets* com 1 cm de diâmetro e com meia-esfera. Isso também afeta o resfriamento dos clínqueres, influenciando a formação das fases cristalinas, nessas diferentes configurações das esferas.

A Figura 7 mostra uma comparação dos teores médios das fases cristalinas nos clínqueres experimentais. Percebe-se que as principais fases do clínquer foram formadas em teores semelhantes aos indicados na literatura especializada para classificá-los como clínquer Portland (50 a 70% de alita) [19], mesmo com as diferentes conformações dos *pellets*, de maneira que não afetou negativamente as suas características mineralógicas.

Também, pode-se perceber que os clínqueres produzidos com incorporação de RCC em substituição total à argila e parcial ao calcário apresentaram maior teor de alita, quando comparados com os clínqueres produzidos com as matérias-primas tradicionais (calcário e argila), mostrando que a substituição é viável tecnicamente, possibilitando menores emissão de CO_2 e de exploração de recursos naturais.

Figure 7 – Comparação entre os teores médios de fases cristalinas dos clínqueres experimentais de referência e com FRCC



Diferentemente da produção laboratorial, em que os clínqueres recebem formatos circulares a partir de moldagem pela mistura da matéria-prima com água, para facilitar a conformação, ainda antes de serem calcinados, sendo chamados de *pellets*, na produção industrial, as matérias-primas moídas são colocadas no forno rotativo, em geral à temperatura de cerca de 1450ºC, sendo a configuração final do clínquer formada de maneira bastante heterogênea e de medidas diversas, com formatos circulares formados devido à movimentação rotativa do forno.

O clínquer industrial é composto de nódulos arredondados, com estrutura maciça e porosa, variando em tamanho de 1 a 30 mm [22]. Durante a calcinação, há uma homogeneidade na transferência de calor nos nódulos, o que não acontece na produção laboratorial, com forno estático, o que proporciona as diferenças nos teores finais das fases cristalinas.

4. CONCLUSÕES

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

- A área superficial específica dos *pellets* conformados influencia na formação das fases alita e belita, devido a diferenças na área de exposição, durante a sinterização e resfriamento;

- Embora haja diferenças nos teores das fases cristalinas nas diferentes conformações dos *pellets*, observa-se que isso não afetou negativamente as características mineralógicas, uma vez que os teores das principais fases do clínquer, mesmo variando, se manteve dentro dos valores indicados na literatura especializada para classificá-los como clínquer Portland (50 a 70% de alita);

- O uso de moldes padroniza e facilita a moldagem dos clínqueres, aumentando a homogeneidade do material produzido;

- Os clínqueres contendo RCC em substituição total à argila e parcial ao calcário apresentaram composição mineralógica semelhante aos clínqueres de referência.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESB, ao PPEC, à UFRB, à Usina de Valorização de Resíduos Grajaú e à cimenteira, pela doação dos materiais, e as instituições onde os ensaios foram realizados: Laboratório de Ensaios em Durabilidade dos Materiais/UFBA, Laboratório de estruturas (Timoshenko)/UFBA e Instituto Federal de Educação da Bahia.

6. REFERÊNCIAS

1. 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, 2019, 64 p.
2. 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.
3. LEITE, M. B. **Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2001.
4. SILVA, LUIZ RICARDO AMARO DA. **Utilização do entulho como agregado para a produção de concreto reciclado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil); Universidade Federal Fluminense, 2004.
5. SILVA, Guilherme Augusto de Oliveira e. **Avaliação da durabilidade de concre-tos contendo agregados reciclados de resíduos de construção civil (RCC)**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPEC. Universidade Federal da Bahia, 2017.
6. AMORIM JÚNIOR, N.S.; SILVA, G.A.O.; RIBEIRO, D.V. **Effects of the incorporation of recycled aggregate in the durability of the concrete submitted to freeze-thaw cycles**. Construction and Building Materials, 161, p. 723–730, 2018.
7. GALBENIS, Christos-Triantafyllos; TSIMAS, Stamatis. **Use of construction and demolition wastes as raw materials in cement clinker production**. China Particuology, V. 4, N. 2, 83-85, 2006.

8. PUERTAS, F.; Díaz, I. García; BARBA, A.; GAZULLA, M. F.; PALACIOS, M.; GÓMEZ, M. P.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S. **Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production**. Cement and Concrete Composites. V. 30, 798–805, 2008.

9. SCHOON, J.; BUYSSER, K.; DRIESSCHE, I.; BELIE, N. **Fines extracted from recycled concrete as alternative raw material for Portland cement clinker production**. Cement and Concrete Composites, Vol. 58, April 2015, p. 70–80, 2015.

10. KIM, Jihoon; TAE, Sungho; KIM, Rakhyun. **Theoretical Study on the Production of Environment-Friendly Recycled Cement Using Inorganic Construction Wastes as Secondary Materials in South Korea**. Sustainability, V. 10, 4449, 2018.

11. AY, Nuran; ÜNAL, Mevlüt. **The use of waste ceramic tile in cement production.** Cement and Concrete Research, V. 30, Issue 3, p. 497-499, 2000.

12. CENTURIONE, S. L. **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.

13. MARINGOLO, V. **Clínquer co-processado: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento**. 2001. 188f. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 2001.

14. COSTA, E. B. da. **Aproveitamento de cinza pesada e anodização do alumínio para a produção do cimento sulfoaluminato de cálcio belítico**. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2016.

15. MARIANI, B.B.; ANDRADE Neto, J.d.; AMORIM Júnior, N.S.; RIBEIRO, D.V. **Utilization of waste from TiO_2 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.

16. COSTA, E. B. da. **Aproveitamento do resíduo de anodização do alumínio na produção do cimento sulfoaluminato de cálcio belítico**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2013.

17. VILAPLANA, A. S.G.; FERREIRA, V. J.; SABIRÓN, A.M.L.; ARANDA-USÓN, A.; LAUSÍN-GONZÁLEZ; BERGANZA-CONDE, C.; FERREIRA, G. **Utilization of Ladle Furnace slag from a steelwork for laboratory scale production of Portland cement**. Construction and Building Materials, V. 94, Nº 30, p. 837-843, 2015.

18. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n° 307. **Diretrizes e procedimentos para gestão dos resíduos de construção**. Brasília, 2002.

19. TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2.ed. London: Thomas Telford, 1997. 476p.

20. SCHOON, J.; HEYDEN, L. V.; ELOY, P.; GAIGNEUX, M.; BUYSSER, K.; DRIESSCHE, I.; BELIE, N. **Waste fibrecement: An interesting alternative raw material for a sustainable Portland clinker production**. Construction and Building Materials, Vol. 36, p. 391-403, 2012.

21. RODRÍGUEZ, N.H.; RAMÍREZ, S.M.; VARELA, M. T. B.; DONATELLO, S.; GUIL-LEM, M.; PUIG, J.; FOS, C.; LARROTCHA, E.; FLORES, J. **The effect of using thermally dried sewage**

sludge as an alternative fuel on Portland cement clinker production. Journal of Cleaner Production, V. 52, Nº 01, p. 94-102, 2013.

22. WINTER, Nicholas B. **Understanding Cement: An introduction to cement pro-duction, cement hydration and deleterious process in concrete**. WHD Microanalyses Consultants. Rendlesham, Woodbridge, UK. 2012.

23. ISAIA, G.C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. V. 2, São Paulo: IBRACON, 2005.