

# Efeito da incorporação de resíduo de TiO<sub>2</sub> (MNR) na formação das fases mineralógicas de clínquer Portland

*Effect of the incorporation of TiO<sub>2</sub> waste (UOW) in the formation of the mineralogical phases of Portland clinker*

Bruna Bueno Mariani  
José da Silva Andrade Neto  
Nilson Santana de Amorim Júnior  
Daniel Véras Ribeiro

## Resumo

O reaproveitamento de resíduos industriais para o setor da construção civil tem se mostrado uma alternativa ambiental e economicamente atrativa, principalmente para a indústria do cimento, que por muito tempo tem procurado procedimentos que efetivamente reduzam a alta energia e emissões de CO<sub>2</sub> gerados durante a produção de clínquer. Nesse sentido, destaca-se a necessidade de utilização de materiais alternativos na produção de clínquer como substitutos parciais às matérias-primas. Dessa forma, o objetivo da presente pesquisa é avaliar a produção de clínquer Portland com baixa emissão de dióxido de carbono a partir da incorporação de minério não reagido (MNR), resíduo gerado durante a produção de dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>). As emissões de dióxido de carbono geradas durante a produção desse material foram verificadas através de análises térmicas (TG/DTG), e a influência do resíduo na formação de fases dos clínqueres foi verificada por análise mineralógica (DRX), por microscopia óptica (MO) e por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A partir dos resultados obtidos, determinou-se o teor de incorporação ideal de TiO<sub>2</sub> para produção de clínquer, sendo constatado que o MNR, até um teor limite de incorporação, atua como mineralizante, sendo, assim, benéfico para a formação de alita.

**Palavras-chave:** Clínquer Portland. Resíduos industriais. MNR. Emissão de CO<sub>2</sub>. Produção de clínquer.

## Abstract

*The reuse of industrial waste in the construction industry has proven to be an environmentally and economically attractive alternative, especially for the cement industry, which has long sought after procedures that effectively reduce the high use of energy and CO<sub>2</sub> emissions generated during clinker production. In this sense, it is necessary to use alternative materials as partial substitutes for raw materials in clinker production. Thus, the objective of this research study is to produce Portland clinker with low carbon dioxide emissions from the incorporation of unreacted ore (UOW), a waste generated during the production of titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>). The carbon dioxide emissions generated during the production of this material were verified by thermal analysis (TG/DTG), and the influence of the waste on the formation of clinker phases was verified by mineralogical analysis (XRD), optical microscopy (MO) and scanning electron microscopy (SEM). The results obtained led to the determination of the ideal incorporation content of TiO<sub>2</sub> for clinker production, and they also showed that the UOW – up to a limit content of incorporation - acts like a mineraliser and is, therefore, beneficial for the formation of alite.*

**Keywords:** Portland clinker. Industrial waste. UOW. CO<sub>2</sub> emissions. Clinker production.

Recebido em 20/02/18  
Aceito em 03/05/18

## Introdução

A crescente atividade industrial em todo o mundo e a falta de programas eficientes de gestão implicam a crescente geração de resíduos sem seu correto aproveitamento e destinação. Dessa forma, a procura por métodos para tratamento de resíduos que sejam ambientalmente amigáveis e benéficos é essencial (RIBEIRO; MORELLI, 2009). Nesse contexto, nos últimos anos, a indústria do cimento, maior consumidora de recursos naturais do mundo, tem adotado a prática do coprocessamento, em que se calcinam resíduos nos fornos rotativos durante a fabricação do clínquer Portland, contribuindo, assim, para a preservação de recursos naturais, já que isso substitui parcialmente as matérias-primas e combustíveis (ASSOCIAÇÃO..., 2015). Essa prática tem sido estudada utilizando-se os mais diversos resíduos, entre eles resíduo da combustão de carvão (CHEN; JUENGER, 2012), resíduo cerâmico (PUERTAS *et al.*, 2008; PUERTAS *et al.*, 2010), escória de forno de panela (COSTA *et al.*, 2013), lodo de anodização do alumínio (COSTA *et al.*, 2014), escória de aciaria e resíduo de granito (PINTO JÚNIOR, 2012), como matéria-prima do clínquer Portland.

Resíduos e subprodutos industriais utilizados na farinha e no combustível para a fabricação de clínquer Portland são fontes significativas de componentes menores, podendo, portanto, exercer influências nas reações de clínquerização e de hidratação do cimento (MARINGOLO, 2001). Como alguns resíduos possuem elementos que diminuem a temperatura de formação dos minerais do clínquer, a utilização desses materiais como substituição parcial ao calcário, na farinha, é efetiva na redução da geração de CO<sub>2</sub> (UCHIKAWA; HANEHARA, 1997). Além disso, o benefício ambiental com o reaproveitamento de resíduos na fabricação de cimento torna-se ainda maior, visto que o cimento se tornará um repositório útil e, assim, oferece ao resíduo, atualmente depositado em aterro, uma destinação permanente e sustentável (MARIANI *et al.*, 2017).

No processo de fabricação do clínquer Portland, o dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) atua como um mineralizante, reduzindo a temperatura de formação da fase líquida e aumentando a quantidade de material fundido, além de alterar a viscosidade e a tensão superficial dessa fase, de forma a aumentar a difusão de íons cálcio. Consequentemente, o TiO<sub>2</sub> acelera a velocidade das reações, o que contribui para a formação da alita e para o consumo da cal livre (KATYAL *et al.*, 1999; MA; CHEN; WANG, 2009; SHANG *et al.*, 2017).

A contribuição do dióxido de titânio para a formação da alita e o consumo da cal livre depende da quantidade adicionada. Com até 1% de adição de TiO<sub>2</sub> é observado um efeito positivo na formação da alita, com consequente aumento na porcentagem de C<sub>3</sub>S presente no clínquer. Porém, para teores acima de 1% efeitos deletérios são observados (KATYAL *et al.*, 1999). Já em relação à cal livre, a quantidade total de CaO pode ser reduzida em 30% a 80% com a adição do dióxido de titânio na farinha do clínquer (KOLOVOS; TSIVILIS; KAKALI, 2002; MA; CHEN; WANG, 2009).

Dessa forma, neste trabalho buscou-se a obtenção de clínquer de reduzido impacto ambiental a partir da incorporação de um resíduo proveniente da fabricação de pigmento branco à base de dióxido de titânio, o minério não reagido (MNR), na farinha. A geração desse resíduo pela Cristal Pigmentos do Brasil, fábrica situada no município de Camaçari, BA, é de aproximadamente 2.500 toneladas por mês. Atualmente o MNR não está inserido em uma proposta de reuso ou reciclagem de forma efetiva no sentido de agregar valor ao ciclo de vida do TiO<sub>2</sub>, sendo disposto em aterro controlado destinado a resíduos industriais, o que representa um elevado custo para a empresa geradora.

Além de fornecer uma destinação ambientalmente segura, tecnicamente viável e com valor agregado para o resíduo, a incorporação do MNR reduz o consumo de calcário, o que preserva matéria-prima não renovável e reduz a emissão de CO<sub>2</sub> proveniente do processo de descarbonatação. Ademais, devido aos elevados teores de TiO<sub>2</sub> na composição do resíduo, este poderá atuar como mineralizante, favorecendo, assim, a formação da fase líquida e, por conseguinte, da alita. Com isso, é possível reduzir as temperaturas de clínquerização e, consequentemente, diminuir a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida com a queima de combustível e/ou aumentar o teor de alita para determinada temperatura.

## Materiais e métodos

### Materiais

Para a produção dos clínqueres utilizaram-se calcário e argila fornecidos pela Mizu Cimentos Especiais, e o minério não reagido (MNR), resíduo proveniente da produção de pigmentos, foi fornecido pela Cristal Pigmentos do Brasil S.A., localizada no município de Camaçari, BA.

Para a produção do pigmento à base de TiO<sub>2</sub>, uma mistura de ilmenita e escória de titânio sofre ataque químico com ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Nessa etapa,

conhecida como sulfatação, um percentual da mistura não reage, tornando-se um resíduo do processo. Essa fração que não reagiu contém grande quantidade de licor de titânio solúvel, que é utilizado para a obtenção do produto final. Dessa forma, o resíduo segue para filtros rotativos a vácuo (FRVs), onde é recuperada parte desse licor, que segue no processo produtivo.

Por fim, o minério não reagido é transportado até um misturador rotativo, onde é neutralizado com cal hidratada. O MNR é, então, transportado para a destinação final, sendo depositado em aterro controlado destinado a resíduos industriais.

O MNR foi coletado conforme metodologia de amostragem de resíduos especificada na norma NBR 10007 (ABNT, 2004). Esse material se apresenta sob a forma de sólido pulverizado com granulometria irregular, que, devido à elevada umidade, se encontra na forma de lama (Figura 1A).

O minério não reagido, o calcário e a argila foram moídos até passarem totalmente na peneira ABNT # 200 (75 µm), em um moinho rotativo horizontal Quimis, modelo Q298, contendo bolas de aço, a fim

de realizar a fragmentação das partículas, aumentando a área superficial e, conseqüentemente, sua reatividade.

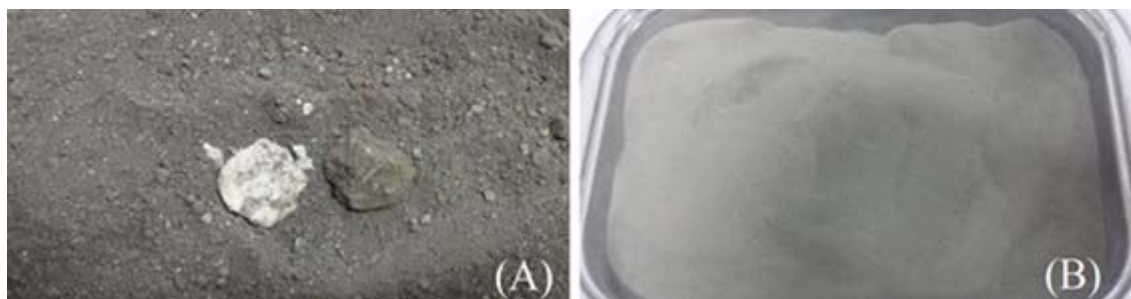
### Caracterização das matérias-primas

As matérias-primas (calcário, argila e MNR) foram caracterizadas física, química e mineralogicamente por meio das análises listadas no Quadro 1. A partir das composições químicas, em óxidos, obtidas por meio de fluorescência de raios X (FRX), foram dosadas farinhas com diferentes teores de MNR.

### Dosagem das farinhas e produção dos clínqueres

Na indústria de cimento, a dosagem das matérias-primas para a composição da farinha normalmente é definida de acordo com as composições químicas, através de módulos químicos que relacionam os óxidos dos quatro componentes principais: CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (MARINGOLO, 2001). Os principais parâmetros químicos utilizados pela indústria cimenteira, bem como os valores típicos de utilização, são apresentados na Tabela 1.

Figura 1 - MNR (A) antes e (B) depois dos processos de homogeneização, moagem e peneiramento



Quadro 1 - Análises realizadas para a caracterização das matérias-primas

Propriedade	Equipamento
Massa específica	Picnômetro a gás hélio, Micromeritics AccuPyc II 1340
Área superficial Blaine	Permeabilímetro de Blaine, BSA 1, Acmel
Composição química	FRX, S2 Ranger, Brucker
Granulometria a laser	Granulômetro a laser, 1180, Cilas

Tabela 1 - Principais parâmetros químicos utilizados pela indústria cimenteira

Sigla	Nome	Fórmula	Valores típicos
FSC	Fator de saturação de cal	$\frac{100CaO}{2,8SiO_2 + 1,2Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3}$	92-98%
MS	Módulo de sílica	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$	2-3
MA	Módulo de alumina	$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$	1-3

Fonte: Centurione (1993) e Winter (2012).

Neste estudo a dosagem da farinha foi realizada prefixando o valor de um dos módulos químicos (FSC) e os teores de titânio, presente no MNR, a serem adicionados. O valor de FSC foi fixado em 98, valor utilizado por diversos pesquisadores (RODRIGUÉZ *et al.*, 2013; SCHOON *et al.*, 2012; VILAPLANA *et al.*, 2015; BURUBERRI; SEABRA; LABRINCHA, 2015) para a produção de clínquer Portland.

Os teores de titânio a serem adicionados foram fixados em 0% (referência), 0,5%, 1,0% e 2,0%, já que a adição de 1% de  $\text{TiO}_2$  representa o ponto de virada em relação à contribuição da formação da alita (KATYAL *et al.*, 1999). As quantidades de MNR adicionadas, de forma a fornecer os teores predeterminados de  $\text{TiO}_2$ , foram definidas após a análise química desse material.

Para a produção dos clínqueres foi adotada a metodologia proposta pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e empregada nos estudos de Centurione (1993), Maringolo (2001) e Costa *et al.* (2013), buscando reproduzir fielmente as etapas do processamento industrial, incluindo a homogeneização e a pré-calcinação da farinha, a sinterização e o resfriamento do clínquer, para que fossem obtidos minerais bem cristalizados. Para isso foram preparadas esferas da farinha com aproximadamente 1,5 g de massa e 1 cm de diâmetro. Para a confecção dessas esferas foi adicionado teor de água igual a 20% (em massa) para dar trabalhabilidade ao material e obter uma consistência adequada.

Em seguida, as esferas foram acondicionadas em cadinhos de alumina (Figura 2a) e inseridas em um forno da marca Link Elektro Therm, modelo KK-220 (Figura 2b), para sinterização. As esferas foram submetidas a uma taxa de aquecimento de  $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ , até atingir a temperatura de  $900\text{ }^\circ\text{C}$ , permanecendo nessa temperatura durante 30 min. A seguir passaram a uma segunda etapa de aquecimento, à mesma taxa ( $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ), até atingir a temperatura final de  $1.340\text{ }^\circ\text{C}$ , na qual permaneceram durante 15 min. Na sequência, o material foi resfriado bruscamente com a abertura do forno, resultando nos clínqueres experimentais.

Com o objetivo de avaliar a influência do MNR na mineralogia do clínquer obtido em diferentes temperaturas, foram produzidos também clínqueres nas temperaturas finais de  $1.200\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1.250\text{ }^\circ\text{C}$  e  $1.300\text{ }^\circ\text{C}$ .

### Análise das farinhas

Foram determinadas as curvas de TG/DTG das farinhas dos clínqueres utilizando uma termobalança da marca Shimadzu, modelo TGA-51-H, em um intervalo de temperatura de  $25\text{ }^\circ\text{C}$  a  $1.000\text{ }^\circ\text{C}$ , com amostras de 10 mg e taxa de aquecimento de  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ . Com a TG/DTG das farinhas foi possível estimar a quantidade de  $\text{CO}_2$  liberada durante o processo de calcinação, já que, de acordo com Brandštetr, Havlica e Odler (1997), essa determinação pode ser realizada com precisão aceitável a partir da perda de massa entre  $700\text{ }^\circ\text{C}$  e  $850\text{ }^\circ\text{C}$ .

Figura 2 - (A) Esferas nos cadinhos de alumina e (B) forno utilizado para a obtenção dos clínqueres



## Avaliação dos clínqueres

A identificação e a quantificação das fases cristalinas dos clínqueres experimentais obtidos nas diferentes temperaturas (1.200, 1.250, 1.300 e 1.340 °C) foram realizadas por difração de raios X (DRX), utilizando, para isso, o difratômetro D2 Phaser da Bruker com tubo de alvo de cobre (comprimento de onda,  $\lambda$ , igual a 0,154060 nm), com corrente de 10 mA e tensão de 30 KV. As análises foram realizadas com a varredura de 5° a 70° (2 $\theta$ ) e incremento de 0,002°/s. Para a identificação das fases cristalinas das amostras foi utilizado o software Diffrac Plus-EVA, e sua quantificação foi realizada utilizando o método de Rietveld por meio do software Diffrac Suite-Topas e o banco de dados do sistema Inorganic Crystal Structure Database (ICSD). O Quadro 2 apresenta as fichas cristalográficas utilizadas para a quantificação de fases pelo método de Rietveld, também adotadas por Gobbo (2003).

A microestrutura dos clínqueres obtidos a 1.340 °C foi analisada por meio da microscopia óptica (MO) por luz refletida, disponível em laboratório de controle de qualidade da cimenteira Mizu Cimentos Especiais. Seções polidas dos clínqueres foram confeccionadas, e, para que a diferenciação entre as fases principais do clínquer fosse possível, realizou-se um ataque químico com ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>, 1% em álcool), que colore distintamente a alita e a belita.

Adicionalmente, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo Vega 3 LMU – Tescan, disponível no Laboratório de Caracterização de Materiais do Instituto Federal da

Bahia (IFBA). As imagens de MEV foram obtidas através de detecção por elétrons secundários (SE) e tensão de 15 kV.

## Resultados e discussões

### Caracterização das matérias-primas

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos nos ensaios de massa específica e de superfície específica Blaine das matérias-primas. Já a Figura 3 apresenta as curvas de distribuição do tamanho de partículas, obtido por meio do granulômetro a laser.

As curvas granulométricas indicam que os diâmetros das partículas das matérias-primas são inferiores a 75  $\mu$ m, estando, assim, essas matérias-primas adequadas para a homogeneização das farinhas. Observando as curvas granulométricas, nota-se que as partículas de MNR possuem dimensão intermediária entre o calcário e a argila, porém isso não é evidenciado nos resultados de área superficial Blaine, que indicam que as partículas de MNR possuem menor área superficial. Essa discrepância provavelmente ocorreu devido à aglomeração das partículas de MNR no ensaio de área superficial Blaine, resultando, assim, em menores áreas superficiais, quando estas deveriam ser maiores. Para determinar o tamanho das partículas, a granulometria a laser é considerada mais confiável devido à dispersão das partículas que ocorre no ensaio.

As composições químicas obtidas por fluorescência de raios X e as perdas ao fogo das matérias-primas são apresentadas na Tabela 3.

Quadro 2 - Fichas cristalográficas utilizada para a quantificação de fases pelo método de Rietveld

Fase	Sistema cristalino	Código ICSD	Referência
Alita	Monoclínico	64.759	Nishi, Takeuchi e Maki (1985)
Belita	Monoclínico	963	Jost, Ziener e Seydel (1977)
C <sub>3</sub> A cúbico	Cúbico	1.841	Mondal e Jeffreery (1975)
C <sub>3</sub> A ortorrômbico	Ortorrômbico	1.880	Nishi e Takeuchi (1975)
C <sub>4</sub> AF	Ortorrômbico	9.197	Couville e Geller (1971)
Cal livre	Cúbico	28.905	Primak, Kaufman e Ward (1948)
Periclásio	Cúbico	64.928	Broch (1927)

Tabela 2 - Massa específica e superfície específica Blaine das matérias-primas

Material	Propriedade	
	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Superfície específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
Calcário	2,73 ± 0,01	6.244 ± 131
Argila	2,67 ± 0,01	6.469 ± 637
MNR	3,25 ± 0,01	5.856 ± 420

Figura 3 - Curva de distribuição do tamanho de partículas das matérias-primas

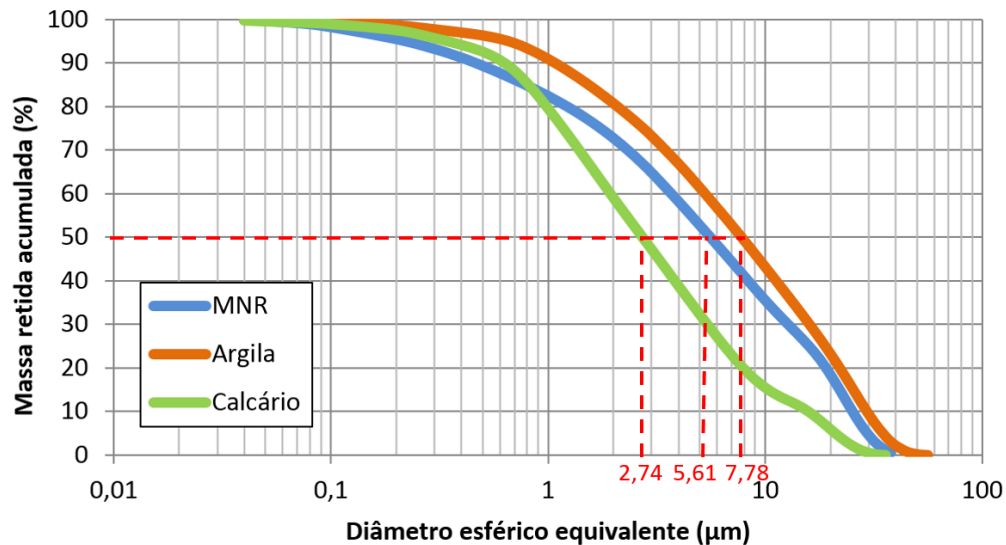


Tabela 3 - Composições químicas obtidas por FRX e perdas ao fogo das matérias-primas utilizadas

Material	Constituinte (%)										
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Outros	PF*
Calcário	47,09	8,21	2,07	1,19	2,06	0,65	-	0,22	0,49	0,12	37,80
Argila	0,24	60,41	21,51	4,94	1,25	1,57	-	1,08	0,12	-	8,47
MNR	12,12	13,50	2,35	6,99	1,37	0,40	2,79	39,86	9,19	3,02	8,15

Nota: \*perda ao fogo.

Todas as matérias-primas apresentam em sua composição química (Tabela 3) os principais componentes que devem ser encontrados no clínquer (cal, sílica, alumina e óxido de ferro). Dessa maneira, a farinha do clínquer não necessitará de corretivos químicos, tais como areia e óxido de ferro.

Como apresentado na Tabela 3, o MNR apresenta alto teor de dióxido de titânio, o que era esperado, visto que o resíduo é gerado na produção de TiO<sub>2</sub>. Sua utilização para a produção de clínquer é atrativa, pois o titânio pode ser incorporado a uma farinha de clínquer sem efeitos deletérios, atuando como mineralizante no processo de clínquerização, o que contribui para a formação da alita e para o consumo de cal livre (POTGIETER *et al.*, 2002; MA; CHEN; WANG, 2009).

Para que tivéssemos teores de titânio adicionados nos teores de 0,5%, 1,0% e 2,0%, conforme previsto anteriormente, foi necessária a adição de 1,29%, 2,58% e 5,16% de MNR.

Outro aspecto que chama a atenção é a alta concentração de enxofre no resíduo. Segundo Kakali *et al.* (2005), o enxofre proveniente da matéria-prima e do combustível usualmente é incorporado nas principais fases do clínquer como sulfato. Porém, na prática, a adição de enxofre deve

ser limitada, já que uma parte do SO<sub>3</sub> pode ser volatizada e causar danos ao processo produtivo, além de causar problemas ambientais. A quantidade de SO<sub>3</sub> adicionada à farinha é geralmente inferior a 2% (HORKOSS; LTEIF; RIZK, 2011), limitando a utilização do MNR utilizado a 22%. Dessa forma, a quantidade de enxofre presente no resíduo está dentro da quantidade considerada adequada para incorporação na farinha até esse teor, uma vez que o teor máximo de MNR incorporado foi de 5,16%.

Em relação à perda ao fogo, o MNR é o que possui a menor perda (8,15%), muito próxima da perda apresentada pela argila (8,47%). Além disso, como esperado, devido ao processo de decarbonatação, o calcário apresenta elevada perda ao fogo (37,80%). Dessa maneira, ao se substituir o calcário pelo MNR na farinha, é esperado que ocorra aumento na produtividade do processo (menor perda de massa da farinha) e, conseqüentemente, menor emissão de CO<sub>2</sub>.

### Dosagem das farinhas

As proporções das matérias-primas e os valores dos diferentes parâmetros químicos (FSC, MS e MA) utilizados para a dosagem das farinhas dos clínqueres produzidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dosagem das matérias-primas e parâmetros químicos das farinhas

Componentes/Parâmetros	Referência	0,5% TiO <sub>2</sub> *	1% TiO <sub>2</sub> *	2% TiO <sub>2</sub> *
% Calcário	90,08	89,10	88,13	86,18
% Argila	9,92	9,61	9,29	8,66
% MNR	0,00	1,29	2,58	5,16
FSC	98	98	98	98
MS	2,41	2,39	2,37	2,33
MA	2,56	2,43	2,30	2,08

Nota: \*teor de TiO<sub>2</sub> incorporado por meio do MNR, em massa.

Todos os parâmetros químicos (Tabela 6) se situam dentro da faixa comum de utilização de clínqueres industriais: 92-98 para o FSC, 2-3 para o MS e 1-3 de MA (TELSCHOW, 2012; WINTER, 2012). Com o aumento no teor de MNR incorporado e, conseqüentemente, aumento no teor de dióxido de titânio adicionado, observa-se redução nos módulos de alumina e de sílica. Isso acontece porque o MNR, em sua composição química (Tabela 5), possui uma relação entre Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,34) menor do que o calcário (1,74) e a argila (4,35) e uma relação entre SiO<sub>2</sub> e a soma entre Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1,45) menor do que a do calcário (2,53) e da argila (2,28).

O módulo de alumina determina a relação potencial entre o C<sub>3</sub>A e o C<sub>4</sub>AF e, dessa forma, ao reduzir o valor desse módulo a partir da incorporação do MNR, é esperada redução da relação C<sub>3</sub>A/C<sub>4</sub>AF (TELSCHOW, 2012). Ademais, o MA interfere na quantidade de fase líquida formada e, por conseguinte, na formação da alita. O MA que proporciona a maior quantidade de fase fundida a temperaturas mais baixas (próximas a 1.300 °C) é 1,38 (WINTER, 2012). Com a incorporação de MNR à farinha, o valor de MA se aproxima do valor considerado ideal para a clinquerização (1,38), o que deve aumentar a quantidade da fase líquida formada, facilitando, assim, a formação e o desenvolvimento dos cristais de alita.

Já o módulo de sílica expressa uma relação direta entre a quantidade de silicatos e aluminatos, e, quanto maior o MS, maior o conteúdo de alita e belita, menor o conteúdo de fase líquida para determinada temperatura e maior a temperatura máxima requerida (WINTER, 2012). Dessa forma, a incorporação de MNR, e a conseqüente diminuição no MS, deve resultar em aumento na quantidade de aluminatos presentes no clínquer, bem como em maior quantidade de fase líquida e em menor temperatura requerida para o processo.

### Análises Termogravimétricas (TG/DTG)

A Figura 4a apresenta as curvas de TG, e a Figura 4b, as curvas de DTG obtidas para as farinhas de referência e para aquelas contendo 0,5%, 1,0% e

2,0% de TiO<sub>2</sub>. Para todas as farinhas observa-se apenas um pico de perda de massa entre 700 °C e 900 °C, que está associado com a decarbonatação do calcário e a liberação de CO<sub>2</sub> (CENTURIONE, 1993). Observa-se ainda que as farinhas contendo MNR apresentam menor perda de massa, conforme esperado, uma vez que o MNR apresenta perda ao fogo inferior ao calcário.

A Tabela 5 apresenta as massas residuais a 1.000 °C, bem como a emissão esperada de CO<sub>2</sub> de cada farinha por tonelada de clínquer produzido, levando em consideração apenas as matérias-primas.

Como pode ser observado na Tabela 5, com a incorporação de 0,5%, 1,0% e 2,0% de TiO<sub>2</sub>, a quantidade de CO<sub>2</sub> liberada na calcinação é reduzida em cerca de 0,18%, 3,33% e 4,99% por tonelada de clínquer respectivamente em relação à farinha de referência. Essa redução ocorre devido à redução da quantidade de calcário utilizada nas farinhas com MNR, já que o resíduo possui em sua composição sulfato de cálcio, reduzindo, portanto, o percentual de carbonato de cálcio na mistura.

### Análise Mineralógica dos Clínqueres (DRX)

Os difratogramas de raios X dos clínqueres sinterizados a 1.340 °C são apresentados na Figura 5. Observam-se picos das principais fases cristalinas esperadas para clínqueres calcinados a 1.340 °C (alita, belita, aluminato tricálcico e ferroaluminato tetracálcico), além de picos das fases cal livre e periclásio.

A cal livre provavelmente permaneceu no clínquer devido a condições insuficientes de queima (tempo e/ou temperatura). Em excesso, essa fase pode gerar fissuras e danos à matriz cimentícia endurecida, já que sua hidratação é expansiva. O periclásio, proveniente do óxido de magnésio presente no calcário, também é indesejável no clínquer, já que apresenta baixa atividade hidráulica e, em excesso, também pode resultar em reações expansivas.

A Tabela 6 e a Figura 6 apresentam as concentrações, em porcentagem, das fases cristalinas nos clínqueres contendo diferentes teores

de  $\text{TiO}_2$  e calcinados em diferentes temperaturas, obtidas pelo método de Rietveld. Na Tabela 6 é apresentado também o indicador estatístico de

refinamento “Rwp” de cada análise. Todos apresentaram valores menores do que 15, indicando, assim, refinamentos otimizados.

Figura 4 - (A) TG e (B) DTG das farinhas com diferentes teores de  $\text{TiO}_2$  incorporado

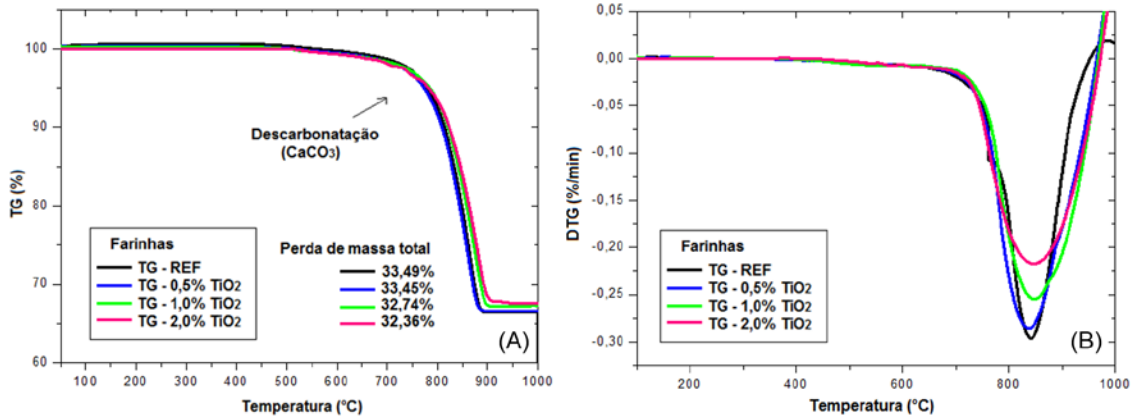


Tabela 5 - Porcentagem de massa residual da farinha e quantidade de  $\text{CO}_2$  emitido por tonelada de clínquer produzido

Farinha	Massa residual (%)	kg $\text{CO}_2$ /ton. de clínquer
Referência	66,51	503,53
0,5% $\text{TiO}_2$	66,55	502,63
1,0% $\text{TiO}_2$	67,26	486,77
2,0% $\text{TiO}_2$	67,63	478,41

Figura 5 - Difratogramas de raios X obtidos para clínqueres calcinados a 1.340 °C.

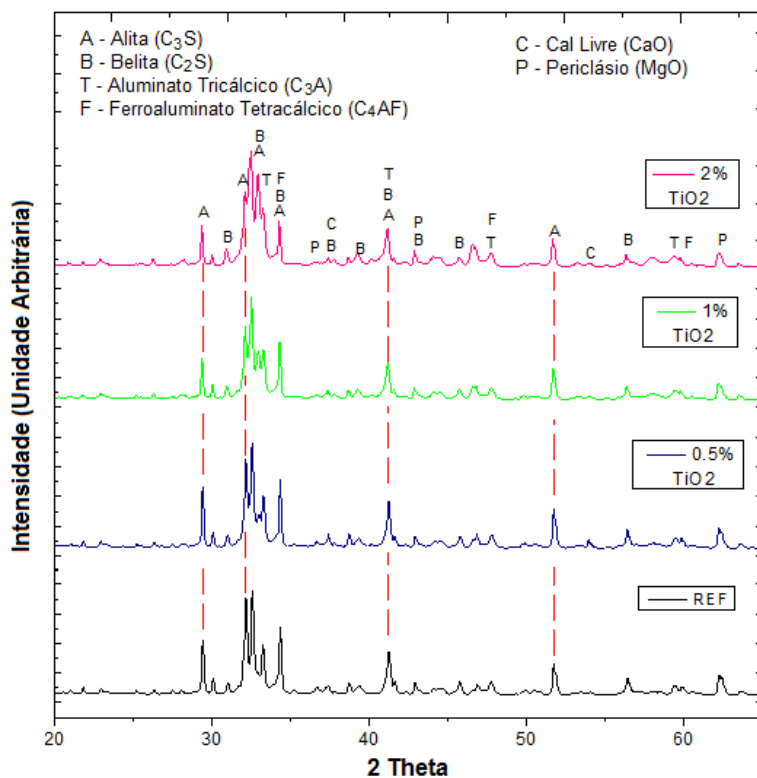
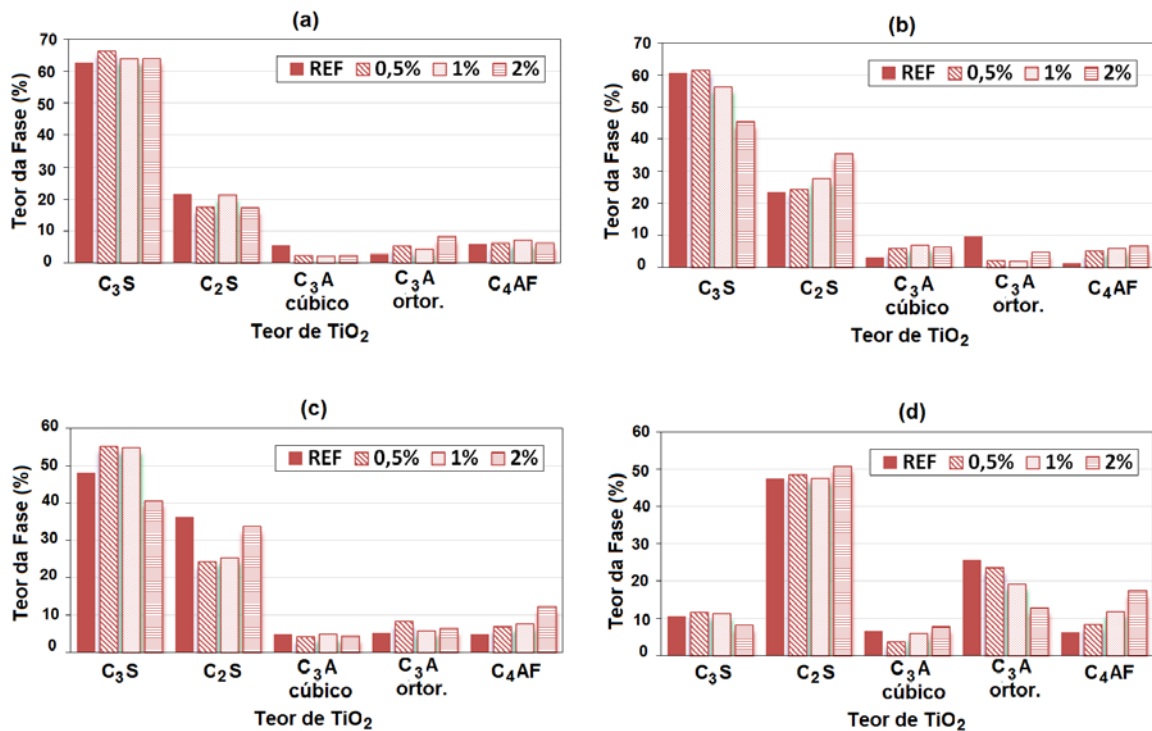




Tabela 6 - Concentrações (%) de compostos cristalinos do clínquer obtidas através do método de Rietveld, de acordo com o software Topas

Clínquer		Concentração das fases cristalinas (%)						Rwp	
		C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A cúbico	C <sub>3</sub> A ortor.	C <sub>4</sub> AF	CaO		MgO
1.340 °C	REF	62,46	21,52	5,50	2,80	6,01	0,16	1,55	8,98
	0,5%	66,45	17,48	2,46	5,28	6,16	0,88	1,29	9,27
	1,0%	64,02	21,20	2,28	4,29	6,95	0,14	1,12	9,97
	2,0%	63,96	17,33	2,34	8,38	6,26	0,25	1,48	11,26
1.300 °C	REF	60,55	23,26	3,01	9,65	1,17	1,09	1,26	10,98
	0,5%	61,56	24,31	5,71	1,93	4,87	0,00	1,61	10,70
	1,0%	56,32	27,58	6,79	1,66	5,85	0,12	1,68	8,00
	2,0%	45,39	35,41	6,25	4,60	6,60	0,00	1,74	9,63
1.250 °C	REF	47,94	36,19	4,64	5,06	4,73	0,05	1,36	11,23
	0,5%	55,14	24,27	4,10	8,15	6,79	0,12	1,42	12,65
	1,0%	54,71	25,23	4,71	5,72	7,45	0,27	1,91	11,95
	2,0%	40,54	33,57	4,20	6,34	12,14	1,53	1,67	10,56
1.200 °C	REF	10,51	47,42	6,49	25,58	6,19	1,69	2,11	12,36
	0,5%	11,55	48,37	3,73	23,50	8,22	2,61	2,03	12,95
	1,0%	11,15	47,40	5,81	19,09	11,75	2,49	2,32	11,36
	2,0%	8,13	50,72	7,73	12,77	17,25	1,07	2,30	11,40

Figura 6 - Teores das principais fases dos clínqueres produzidos nas temperaturas de (a) 1.340 °C, (b) 1.300 °C, (c) 1.250 °C e (d) 1.200 °C



Analisando os dados apresentados na Tabela 6 e na Figura 6, observa-se que, para todas as temperaturas de calcinação analisadas, os clínqueres com 0,5% de TiO<sub>2</sub> adicionado apresentam os maiores teores de alita. Contudo, os clínqueres com 2% de TiO<sub>2</sub> apresentam teores de alita próximos ou inferiores ao

de referência, a depender da temperatura de calcinação.

A adição de quantidades moderadas de titânio (até 1,0%) na farinha reduz a temperatura de formação e a viscosidade da fase líquida (TAYLOR, 1997; SOHN *et al.*, 2012), aumentando, assim, a difusão de íons cálcio (ENGELSEN, 2007). Com isso, é

observado aumento no teor de alita, mineral que se forma a partir da difusão de íons cálcio em direção aos cristais de belita. Contudo, em teores superiores a 1,0%, observa-se um efeito deletério na formação da alita (KATYAL *et al.*, 1999).

Como o calcário e a argila também apresentam titânio em sua composição química (Tabela 4), ao se adicionar 0,5% de  $TiO_2$  proveniente do MNR, a farinha possui um teor de  $TiO_2$  próximo a 1,0% (Tabela 6), o que explica o fato de o clínquer contendo 0,5% de  $TiO_2$  (1,29% MNR) apresentar os maiores teores de alita. Já as farinhas com 1,0% e 2,0% de  $TiO_2$  (2,58 e 5,16% de MNR) possuem 1,5% e 2,5% de  $TiO_2$  respectivamente, o que explica a diminuição no teor de alita em relação ao clínquer com 0,5% de  $TiO_2$  incorporado.

Para os clínqueres calcinados na temperatura de 1.200 °C, observa-se baixo teor de alita, indicando que essa temperatura foi insuficiente para o desenvolvimento dos cristais de  $C_3S$ . Esse comportamento já era esperado porque, apesar de ocorrer a cristalização das primeiras alitas por volta de 1.200 °C (CENTURIONE, 1993), a fase líquida só é formada em temperaturas próximas a 1.250 °C, o que intensifica a difusão de íons cálcio e promove o desenvolvimento dos cristais de  $C_3S$  (TELSCHOW, 2012).

Em relação à belita, verifica-se na Figura 6 que, em geral, os clínqueres com incorporação de até 1,0% de  $TiO_2$  apresentam decréscimo em seus teores. Esse comportamento é possivelmente decorrente do maior teor de alita desses clínqueres, já que essa fase se origina a partir de cristais preexistentes de belita e cal livre (CENTURIONE, 1993).

Também foram identificadas fases cristalinas de  $C_3A$  ortorrômbico e cúbico em todos os clínqueres. O  $C_3A$  no clínquer é normalmente cúbico, contudo pequenas quantidades do polimorfo ortorrômbico também podem estar presentes, sendo favorecidas pelo aumento do teor álcalis nas matérias-primas e/ou pelo resfriamento rápido do clínquer (ALONSO; PUERTAS, 2015).

Em relação aos teores de  $C_3A$  cúbico e ortorrômbico, conforme pode ser observado na Figura 6, não existe uma tendência de comportamento ao se incorporar o MNR à farinha do clínquer. Apesar de possuir em sua composição  $Na_2O$  (ver Tabela 3), que favorece a formação do  $C_3A$  ortorrômbico, o MNR possui também  $SO_3$ , que favorece a formação de  $C_3A$  cúbico (GOBBO, 2003). Dessa forma, com a ação conjunta desses efeitos, não foi possível observar uma influência clara e direta do MNR na formação das fases polimorfas do  $C_3A$ .

Observou-se ainda aumento nos teores de  $C_4AF$  com o aumento nos teores de  $TiO_2$  para todas as temperaturas de calcinação. Esse comportamento provavelmente está associado à diminuição no módulo de alumina (MA) a partir da incorporação de MNR (Tabela 4).

Em relação à cal livre (CaO), todos os clínqueres, com exceção de alguns clínqueres calcinados a 1.200 °C, apresentaram teores abaixo de 2%, o que indica que esses clínqueres não deverão apresentar problemas devido à reação expansiva dessa fase durante a hidratação (GOBBO, 2003). Os clínqueres calcinados a 1.200 °C apresentaram maiores teores devido às condições insuficientes de queima para a formação da alita. Ademais, não se observou influência direta do MNR na formação dessa fase.

Por fim, em relação ao periclásio (MgO), todos os clínqueres apresentaram limites inferiores a 4%, o que indica que estes não devem apresentar problemas devido à reação expansiva do periclásio (WINTER, 2012). Além disso, não se observou influência direta do MNR na formação dessa fase, o que já era esperado devido aos baixos teores de MgO na composição química do resíduo, próximo dos teores de MgO presentes no calcário e na argila (Tabela 3).

## Análise microestrutural (MO e MEV)

A Figura 7 apresenta as microestruturas dos clínqueres de 0% (referência), 0,5%, 1,0% e 2,0% de  $TiO_2$  sinterizados a 1.340 °C. As análises foram realizadas por microscopia óptica por luz refletida, em laboratório, pela Mizu Cimentos Especiais.

Os clínqueres apresentaram cristais de alita bem formados, equidimensionais, com bordas sub-retilíneas, com sinal de corrosão, evidenciando, assim, o resfriamento brusco (PECCHIO, 2013). Além disso, foi verificado que os cristais de alita observados possuem formas e dimensões normalmente observadas em clínqueres industriais, variando de hexagonais a xenomórficos, com 30  $\mu m$  a 40  $\mu m$ , apresentando inclusão normal, constituída por belita e, secundariamente, fase intersticial. É possível observar ainda, na Figura 7, aumento na dimensão média dos cristais de alita com a incorporação do MNR, indicando, assim, o efeito mineralizante do resíduo, que acelera as reações no processo de clinquerização e promove o desenvolvimento dos cristais de  $C_3S$ . No clínquer de referência (REF) foram observados cristais de  $C_3S$  com dimensões médias de 30  $\mu m$ ; já nos clínqueres com 0,5% de  $TiO_2$ , os cristais apresentaram 35  $\mu m$ ; e com 1,0 e 2,0%, os cristais se desenvolveram até 40  $\mu m$ .

Em relação à belita, é possível observar em todos os clínqueres (Figura 7) cristais arredondados em zonas regulares. Já a fase intersticial, que preenche os vazios entre os silicatos, ao se cristalizar, apresenta-se em todos os clínqueres na forma de uma matriz de  $C_4AF$  e  $C_3A$  predominante clara. Essa fase é observada na forma cristalizada, o que indica seu resfriamento brusco ou normal. Já sua forma semicristalina indicaria resfriamento normal a lento (COSTA *et al.*, 2013). Quanto à cal livre, foram verificados cristais arredondados em zonas regulares e dispersos entre os demais cristais.

A Figura 8 apresenta as micrografias dos clínqueres Portland produzidos obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com escalas iguais.

Analisando as micrografias apresentadas na Figura 8, observa-se redução no volume de poros com o

aumento do teor de MNR incorporado. Esse comportamento pode ser explicado pelo efeito mineralizante do  $TiO_2$  presente na composição do MNR, responsável por favorecer a formação de fase líquida durante o processo de clínquerização, além de diminuir a viscosidade desta. Com o aumento da quantidade e a redução da viscosidade da fase líquida, melhora-se a dispersão desta no material, que apresentará menor teor de vazios ao fim do processo, já que essa fase se cristaliza durante o resfriamento, tornando-se  $C_3A$  e  $C_4AF$ .

## Conclusões

De acordo com os resultados obtidos, verificou-se o bom desempenho do clínquer produzido com a incorporação de MNR, em proporções específicas, sendo necessários estudos complementares para comprovar sua viabilidade técnica e econômica.

Figura 7 - Microestrutura dos clínqueres sinterizados a 1.340 °C obtida por microscopia óptica por luz refletida; (a) Referência, (b) 0,5% de  $TiO_2$ , (c) 1,0% de  $TiO_2$  e (d) 2,0% de  $TiO_2$

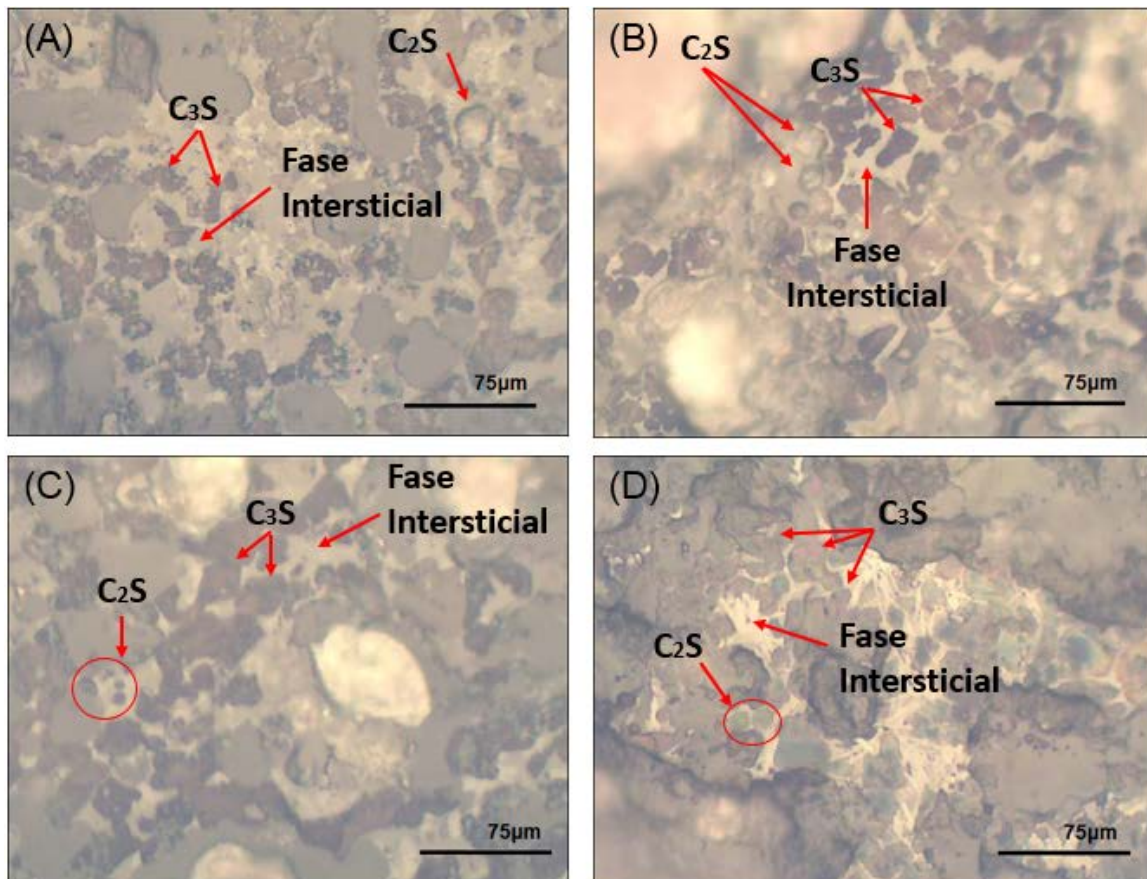
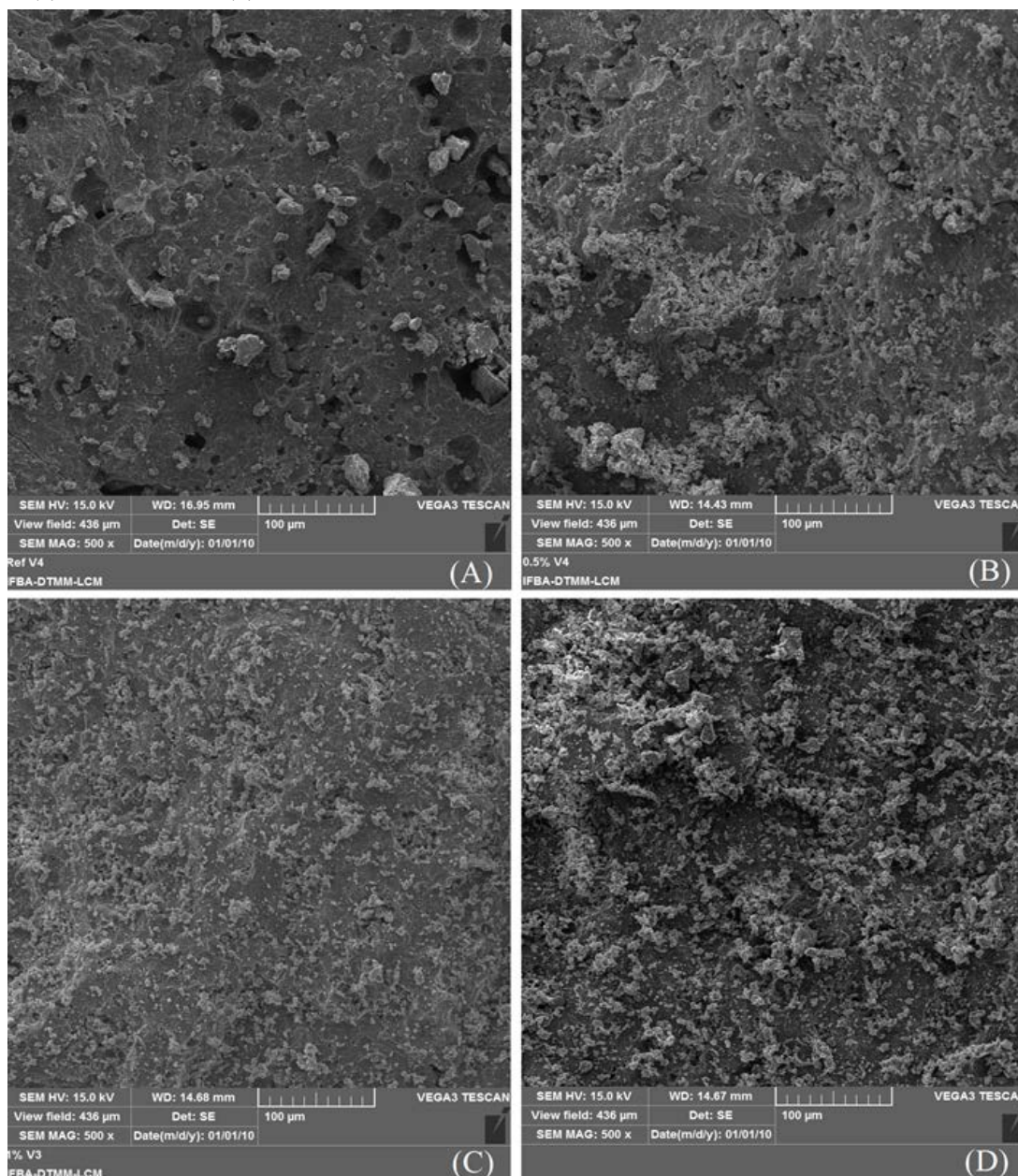


Figura 8 - Micrografias dos clínqueres Portland produzidos obtidas por MEV; (a) Referência, (b) 0,5% de  $\text{TiO}_2$ , (c) 1,0% de  $\text{TiO}_2$  e (d) 2,0% de  $\text{TiO}_2$



Dessa forma, no presente trabalho pode-se chegar às conclusões a seguir.

- (a) quanto ao desempenho dos clínqueres produzidos, todas as fases principais ( $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ ) foram formadas com a utilização do MNR em substituição parcial ao calcário, em temperatura significativamente inferior à industrialmente utilizada (1.340 °C);
- (b) o MNR promoveu maior formação de fase líquida, tornando as microestruturas dos clínqueres mais densas;
- (c) o MNR atua como mineralizante, acelerando as reações no processo de clinquerização e

- aumentando o percentual de alita presente no clínquer;
- (d) o clínquer considerado ideal, com melhor formação de fases desejadas, foi o clínquer com 0,5% de incorporação de  $\text{TiO}_2$ ;
- (e) a incorporação de MNR na farinha do clínquer favoreceu a formação de  $\text{C}_4\text{AF}$ ;
- (f) o MNR não influenciou significativamente na formação das fases polimórficas do  $\text{C}_3\text{A}$  e na formação da cal livre e do periclásio; e
- (g) a incorporação do resíduo reduziu a emissão de  $\text{CO}_2$  advinda do processo de decarbonatação.

## Referências

- ALONSO, M. M.; PUERTAS, F. Adsorption of PCE and PNS Superplasticisers on Cubic and Orthorhombic C3A: effect of sulfate. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 324-332, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Panorama do Coprocessamento: Brasil 2015**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br>>. Acesso em: 20 ago. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- BRANDŠTETR, J.; HAVLICA, J.; ODLER, I. Properties and Use of Solid Residue From Fluidized Bed Coal Combustion. In: CHANDRA, S. **Waste Materials Used in Concrete Manufacturing**. Westwood: Noyes, 1997.
- BROCH, E. Crystal Structure. **Zeitschrift fuer Physikalische Chemie**, v. 127, p. 446-454, 1927.
- BURUBERRI, L. H.; SEABRA, M. P.; LABRINCHA, J. A. Preparation of Clinker From Paper Pulp Industry Wastes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 286, n. 9, p. 252-260, 2015.
- CENTURIONE, S. L. **Influência das Características das Matérias-Primas no Processo de Sinterização do Clínquer Portland**. São Paulo, 1993. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- CHEN, I. A.; JUENGER, M. Incorporation of Coal Combustion Residuals Into Calcium Sulfoaluminate-Belite Cement Clinkers. **Cement & Concrete Composites**, v. 34, n. 8, p. 893-902, 2012.
- COSTA, E. B. *et al.* Avaliação da Perda de Massa de Farinhas Precursoras de Clínquer CSAB Compostas Com Lodo de Anodização do Alumínio. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, p. 291-300, 2014.
- COSTA, E. B. *et al.* Clínquer Portland Com Reduzido Impacto Ambiental. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 75-86, abr./jun. 2013.
- COUVILLE, A. A.; GELLER, S. The Crystal Structure of Brownmillerite  $\text{Ca}_2\text{FeAlO}_6$ . **Acta Crystallography**, v. 7, p. 519-525, 1971.
- ENGELSEN, C. J. **Advanced Cementing Materials Reduced CO<sub>2</sub> Emissions: effect of mineralizers in cement production**. Building and Infrastructure. Noruega: Sintef, 2007. (Série Texto Técnico, COIN/P1/SO1.1F).
- GOBBO, L. A. **Os Compostos do Clínquer Portland**: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld. São Paulo, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- HORKOSS, S.; LTEIF, R.; RIZK, T. The Effect of Clinker SO<sub>3</sub> on the Mineralogical Composition of the Cement and Its Expected Impact on Sulfate Resistance Level. **Advances in Cement Research**, v. 23, n. 4, p. 193-201, 2011.
- JOST, K. H.; ZIEMER, B.; SEYDEL, R. Redetermination of the Structure of Dicalcium Silicate. **Acta Cryst**, v. B33, p. 1696-1700, 1977.
- KAKALI, G. *et al.* Use of Secondary Mineralizing Raw Materials in Cement Production: a case study of a wolframite-stibnite ore. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, p. 155-161, 2005.
- KATYAL, N. K. *et al.* Influence of Titania on the Formation of Tricalcium Silicate. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 355-359, 1999.
- KOLOVOS, K.; TSIVILIS, S.; KAKALI, G. The Effect of Foreign Ions on the Reactivity of the  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ : part II: cations. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 463-469, 2002.
- MA, X.; CHEN, H.; WANG, P. Effect of TiO<sub>2</sub> on the Formation of Clinker With High C<sub>3</sub>S. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater Science**, v. 4, n. 5, p. 830-833, 2009.
- MARIANI, B. B. *et al.* Produção de Clínquer Portland Com Incorporação de Resíduo de TiO<sub>2</sub>. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 61., Gramado, 2017. **Anais...** Gramado, 2017.
- MARINGOLO, V. **Clínquer Co-Processado**: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento. São Paulo, 2001. Tese (Doutorado em Mineralogia Aplicada) – Departamento de Mineralogia e Petrologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- MONDAL, P.; JEFFERY, J. W. The Crystal Structure of Tricalcium Aluminate,  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ . **Acta Crystallographica**, v. B31, p. 689-697, 1975.

NISCHI, F.; TAKÉUCHI, Y. The  $Al_2O_3$  Rings of Tetrahedra in the Structure of  $Ca_{8.5}NaAl_6O_{18}$ . **Acta Crystallographica**, v. 31, p. 1169-1173, 1975.

NISHI, F.; TAKEUCHI, Y.; MAKI, I. Tricalcium Silicate,  $Ca_3O(SiO_4)$ : the monoclinic superstructure. **Z. Kristallogra**, v. 172, p. 297-314, 1985.

PECCHIO, M. **A influência de Fósforo, Enxofre e Estrôncio na Mineralogia do Clínquer Portland**. São Paulo, 2013. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) – Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

PINTO JÚNIOR, L. A. B. **Fabricação de Cimento Portland Contendo Mistura de Escória de Aciaria e Resíduo de Granito**. Vitória, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

POTGIETER, J. H. *et al.* Evaluation of the Incorporation of a Titanium Dioxide Producer's Waste Material in Portland Cement Clinker. **Materials Letters**, v. 57, n. 1, p. 157-163, 2002.

PRIMAK, W.; KAUFMAN, H.; WARD, R. X-Ray Diffraction Studies of Systems Involved in the Preparation of Alkaline Earth Sulfide and Selenide Phosphors. **Journal of the American Chemical Society**, v. 70, p. 2043-2046, 1948.

PUERTAS, F. *et al.* Ceramic Wastes as Alternative Raw Materials for Portland Cement Clinker Production. **Cement & Concrete Composites**, v. 30, p. 798-805, 2008.

PUERTAS, F. *et al.* Clinkers and Cements Obtained From Raw Mix Containing Ceramic Waste as a Raw Material: characterization, hydration and leaching studies. **Cement & Concrete Composites**, v. 30, p. 798-805, 2010.

RIBEIRO, D. V.; MORELLI, M. R. **Resíduos Sólidos: problema ou oportunidade?** Rio de Janeiro: Interciência, 2009.

RODRÍGUEZ, N. H. *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.

SCHOON, J. *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.

SHANG, D. *et al.* Incorporation Mechanism of Titanium in Portland Cement Clinker and Its Effects on Hydration Properties. **Construction and Building Materials**, v. 146, n. 15, p. 344-349, 2017.

SOHN, I. *et al.* Influence of  $TiO_2$  on the Viscous Behavior of Calcium Silicates Melts Containing 17 Mass%  $Al_2O_3$  and 10 Mass% MgO. **ISIJ International**, v. 52, n. 1, p. 158-160, 2012.

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

TELSCHOW, S. **Clinker Burning Kinetics and Mechanism**. 2012. Thesis (Ph.D. Thesis) – Technical University of Denmark, 2012.

UCHIKAWA, H.; HANEHARA, S. Recycling of Waste as an Alternative Raw Material and Fuel in Cement Manufacturing. In: CHANDRA, S. (Ed.). **Waste Materials Used in Concrete Manufacturing**. Westwood: Noyes, 1996.

VILAPLANA, A. S. G. *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.

WINTER, N. B. **Understanding Cement**. Woodbridge: WHD Microanalysis Consultants, 2012.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPEC), ao Laboratório de Ensaios em Durabilidade dos Materiais (LEDMA) e a Mizu Cimentos Especiais.

**Bruna Bueno Mariani**

Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Escola Politécnica | Universidade Federal da Bahia | Rua Aristides Novis, 2, 3º andar, Federação | Salvador - BA - Brasil | CEP 40210-630 | Tel.: (71) 3283-9593 | E-mail: brunabmariani@gmail.com

**José da Silva Andrade Neto**

Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Escola Politécnica | Universidade Federal da Bahia | E-mail: josedasilvaandradeneto@gmail.com

**Nilson Santana de Amorim Júnior**

Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Escola Politécnica | Universidade Federal da Bahia | E-mail: nilson.amorim18@gmail.com

**Daniel Véras Ribeiro**

Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Escola Politécnica | Universidade Federal da Bahia | Tel.: (71) 3283-9852 | E-mail: verasribeiro@hotmail.com

***Revista Ambiente Construído***

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

Fax: +55 (51) 3308-4054

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.