

Caracterização de cimentos compostos com resíduo da indústria de cerâmica vermelha

(Characterization of blended cements with red clay industry waste)

A. L. Castro¹, R. F. C. Santos², K. M. Gonçalves², V. A. Quarcioni²

¹Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de S. Carlos, Universidade de S. Paulo, Av. Trabalhador Sancarlenense 400, S. Carlos, SP 13566-590

²Laboratório de Materiais de Construção Civil, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de S. Paulo, Av. Prof. Almeida Prado 532, S. Paulo, SP 05508-901

alcastro@sc.usp.br

Resumo

Atualmente, com a incorporação de adições minerais, é possível produzir cimentos compostos com características específicas para uma determinada aplicação. Além da economia associada à redução de energia e de clínquer, o crescimento da utilização desses cimentos deve-se ao seu melhor desempenho mecânico e de durabilidade quando comparado ao cimento comum. Neste contexto, no presente trabalho, o resíduo de cerâmica vermelha foi moído para a produção de uma adição mineral. Posteriormente, ele foi combinado com um cimento Portland de alta resistência inicial para a produção de cimentos compostos. Considerando os teores de clínquer e de material pozzolânico estabelecidos em norma, foram produzidos em laboratório um cimento composto com pozolana e um cimento pozzolânico. A composição química, as propriedades físicas (massa específica, área superficial específica, água da pasta de consistência normal, tempo de pega e estabilidade volumétrica) e mecânicas (resistência à compressão) desses cimentos foram determinadas e comparadas com as propriedades de cimentos compostos comerciais. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que os cimentos compostos produzidos em laboratório atenderam aos requisitos químicos e físicos das normas correspondentes. Quanto às propriedades mecânicas, esses cimentos apresentaram desempenho mecânico superior aos cimentos comerciais, com valores de resistência até 50% maior que os respectivos cimentos compostos comerciais. Assim, a pozolana obtida a partir de resíduos de cerâmica vermelha apresenta-se como uma potencial alternativa de adição mineral para a produção de cimento Portland.

Palavras-chave: resíduo, cerâmica vermelha, pozolana, cimento composto, propriedades.

Abstract

Nowadays, with the incorporation of mineral additions, it is possible to produce blended cements with specific properties for a given use. Besides cost savings associated with reduced energy and clinker, the increasing use of these cements is due to their better mechanical performance and durability compared to ordinary cement. In this context, in the present work, the red clay industry waste was ground to produce a mineral addition. Later it was combined with a high early strength Portland cement for the production of blended cements. Considering the content of clinker and pozzolanic material set in standards, a pozzolan-modified cement and a pozzolan cement were produced in the laboratory. The chemical composition, physical characteristics (density, specific surface area, normal consistency paste, setting time and soundness) and mechanical properties (compressive strength) of these cements were determined and compared with the properties of commercial cements. From the results, it was verified that the blended cements produced in the laboratory met the chemical and physical requirements of the corresponding standards. Regarding the mechanical properties, these cements showed superior mechanical performance compared to the commercial cements, with strength values up to 50% higher than the respective commercial blended cements. Thus, the pozzolan obtained from red clay industry waste is a potential alternative of mineral addition to the production of Portland cement.

Keywords: waste, red clay, pozzolan, blended cement, properties.

INTRODUÇÃO

A construção civil tem papel fundamental para atingir os objetivos globais do desenvolvimento sustentável, uma vez que o setor consome grande quantidade de recursos naturais. Além disso, gera grande quantidade de resíduos sólidos e gases poluentes, tanto na fase de extração das matérias-primas, como na fabricação, no transporte, no uso, na manutenção e no descarte. Dentre os materiais de construção normalmente

empregados, o cimento Portland é utilizado de maneira expressiva na construção civil por suas inúmeras aplicações. Com este material é possível produzir pastas, argamassas, concretos, grautes e outros compósitos utilizados na produção de artefatos, elementos estruturais pré-fabricados e moldados no local [1]. Dessa forma, a grande versatilidade nas aplicações do cimento Portland explica seu grande consumo mundial, com perspectiva de atingir cerca de cinco bilhões de toneladas em 2050 [2]. De uma maneira geral, o cimento

Portland é obtido a partir da calcinação e clínquerização de uma mistura de calcário e argila em proporções adequadas, sendo a qualidade final do material dependente das matérias-primas utilizadas, das adições feitas posteriormente à calcinação e do grau de finura atingido pela moagem [3]. Porém, do ponto de vista ambiental, seu processo de produção é um dos processos industriais de maior impacto ambiental, sendo responsável por cerca de 5% das emissões mundiais de CO₂. Cerca da metade das emissões de CO₂ vinculadas ao processo de produção do cimento ocorre durante a descarbonatação do calcário para transformar-se no clínquer (etapa da clínquerização). A outra parcela é predominantemente resultante da queima de combustíveis fósseis no forno de clínquer, além das emissões ligadas ao transporte de matéria-prima e ao uso da eletricidade [2].

Três vetores concentram as iniciativas da indústria cimenteira brasileira e mundial para a mitigação dos gases de efeito estufa: a eficiência energética, o uso de combustíveis alternativos ou de fontes renováveis e o uso de cimento com adições (cimentos compostos). No caso do uso de cimentos compostos, a mitigação das emissões dos gases de efeito estufa está relacionada com a adição de escórias, materiais pozolânicos e filer calcário. Utilizados desde o início da década de 1950, os cimentos compostos levam à diminuição na utilização de clínquer e à consequente menor liberação de CO₂, reduzindo as emissões totais de CO₂ por tonelada de cimento produzido [2]. Na prática, o cimento Portland é especificado de acordo com sua composição química, tipo de adições, características físicas e propriedades mecânicas. Atualmente, o Brasil dispõe de oito tipos básicos de cimento Portland normalizados, podendo chegar a mais de vinte tipos quando considerados os subtipos e classes de resistência. Porém, hoje em dia, é possível produzir novos cimentos a partir de um material fornecido por uma fábrica de cimento, com características específicas para uma determinada utilização. A incorporação de adições minerais na produção desses cimentos tem aumentado nos últimos anos, e fatores ambientais, econômicos e tecnológicos têm um papel importante nesse crescimento. As adições minerais fornecem um conforto ambiental, pois subprodutos industriais são reciclados, emissões perigosas lançadas na atmosfera são reduzidas, matérias-primas são preservadas e energia é economizada [4]. Como normalmente as adições são utilizadas em substituição ao clínquer (insumo mais caro), permitem uma redução dos custos de materiais à base de cimento [5]. Além disso, do ponto de vista tecnológico, por interagir química e fisicamente com os produtos da hidratação do clínquer ou do cimento, modificam a microestrutura do material e, com isso, melhoram algumas propriedades das argamassas e concretos [3].

Neste contexto situa-se a incorporação da pozolana obtida a partir de resíduos da indústria de cerâmica vermelha que, combinada em proporções adequadas com o cimento de alta resistência inicial disponível no mercado, resulta na produção de cimentos compostos. Além da economia associada à redução de energia e de clínquer, o crescimento da utilização de cimentos compostos deve-se ao seu melhor de-

sempenho quando comparado ao cimento comum, tanto em relação à resistência mecânica quanto à durabilidade frente à ação de agentes agressivos [5-12]. Apesar dos esforços e recentes avanços da indústria de cerâmica vermelha nacional, um entrave que persiste em parcela significativa desse segmento refere-se às perdas ao longo do processo produtivo e que interferem na competitividade das empresas. Quando os defeitos acontecem antes da queima, em que pesa a queda de produtividade, os produtos extrudados podem ser reprocessados. No entanto, o mesmo não ocorre com as peças defeituosas após a queima que, por não ter até o momento nenhum aproveitamento em larga escala, vêm sendo descartadas junto aos empreendimentos cerâmicos. Além das perdas econômicas, esse processo cumulativo de resíduos tem resultado em passivos ambientais de dimensões consideráveis nas aglomerações cerâmicas: estima-se que as perdas em produtos cerâmicos acabados situam-se na faixa de 3% a 5%, representando um descarte anual de cacos cerâmicos de cerca de 0,8 a 1,3 milhão de toneladas no território paulista [13, 14]. Com o intuito de reduzir os passivos ambientais gerados pelas indústrias de cerâmica vermelha, diminuir os custos operacionais e agregar valor aos produtos dessas empresas, têm sido desenvolvidas pesquisas contemplando o aproveitamento desses resíduos como adição mineral para produção de cimento, argamassa e concreto aplicados na construção civil.

A aplicação de resíduos de cerâmica vermelha como adição mineral para produção de materiais cimentícios foi considerada em função da composição química do material ser compatível com a composição química de outros materiais utilizados para a mesma finalidade [5-12]. A indústria de cerâmica vermelha utiliza a chamada massa monocomponente, composta basicamente por argilas. No entanto, como os minerais da argila apresentam-se cristalinos, a argila em forma bruta não possui propriedades pozolânicas, sendo necessário aplicar um tratamento térmico para torná-la ativa. O tratamento, realizado entre 500 e 800 °C, altera a estrutura cristalina das argilas por meio de transformações químicas, formando um aluminossilicato com estrutura amorfa, que determina o grau de atividade pozolânica do material [6-8]. Quando devidamente cominuídos, a reatividade química desses materiais apresenta basicamente caráter pozolânico. Porém, a partir de 900 °C, inicia-se a formação de fases cristalinas estáveis, inibindo de forma crescente a sua reatividade [14]. No Brasil, como as temperaturas de queima empregadas no processo de produção dos blocos e telhas cerâmicas usualmente variam entre 700 e 900 °C, os resíduos desses componentes da construção, moídos em finura adequada, podem se tornar pozolanas ativas se a argila de origem e o processo de queima fornecerem as condições necessárias para isso. Assim, no presente trabalho, o resíduo de cerâmica vermelha, decorrente da produção de blocos de vedação e telhas cerâmicas, foi moído em laboratório para a produção da pozolana. Posteriormente, ela foi combinada com um cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI) disponível comercialmente no Brasil para a produção de cimento composto com pozolana (CPII Z) e cimento po-

zolânico (CPIV). As propriedades químicas, físicas e mecânicas desses cimentos foram determinadas e comparadas com as propriedades de cimentos compostos comerciais.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Produção da pozolana

O resíduo de cerâmica vermelha, coletado em cacos, foi moído em laboratório considerando duas fases de moagem para a produção da pozolana [13]: inicialmente até totalmente passante na peneira de abertura de 0,85 mm (20 mesh); e posteriormente até totalmente passante na peneira de abertura de 0,075 mm (200 mesh). Na primeira fase da moagem todo o material coletado foi britado por meio de um britador de mandíbula com capacidade para quebra dos cacos em frações com até 2 cm de tamanho. Em seguida, o material foi seco em estufa até obtenção de massa constante. Na sequência, o material pré-moído e seco foi britado por meio de outro britador de mandíbula com abertura menor. O material obtido foi quarteado e colocado em tambor para homogeneização por rolagem.

A segunda fase da britagem dos cacos cerâmicos, destinada à produção da pozolana, foi realizada utilizando-se um moinho de bolas (vaso de moagem com capacidade de 50 L, e 28,56 kg de esferas de aço com dimensões de 25,4 e 46,0 mm). Para evitar a aglomeração das partículas do material, em função do seu pequeno tamanho, foi utilizado um aditivo de moagem (Grace MDTA 300), que atua nas cargas de superfície das partículas. O processo de moagem foi realizado ininterruptamente durante 2 h. Ao término desse período, o material obtido foi avaliado e utilizado como adição mineral para a produção dos cimentos compostos por meio da determinação de sua composição química, propriedades físicas e mecânicas, a saber: i) composição química: determinada por meio de análise química, realizada de acordo com procedimentos de ensaio internos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), elaborados com base em diretrizes de normas brasileiras correspondentes [15-22]; ii) distribuição granulométrica: efetuada por intermédio da técnica analítica de difração de raios laser utilizando-se um granulômetro a laser (MasterSizer 2000, Malvern), com base na ISO 13320:2009 [23], empregando como meio de dispersão o etanol; iii) massa

específica: ensaio realizado com o auxílio do frasco volumétrico de Le Chatelier, seguindo as especificações da NBR NM 23:2001 [24]; iv) área superficial específica: ensaio realizado a partir do método de permeabilidade ao ar, utilizando um aparelho Blaine (Pavitest), de acordo com a NBR NM 76:1998 [25]; v) ensaio mecânico: utilizado para avaliação da atividade pozolânica do material produzido por meio da determinação do índice de atividade com cal, realizado de acordo com as especificações da NBR 5751:2012 [26].

Produção dos cimentos compostos

No Brasil, dentre os cimentos normalizados e disponíveis para comercialização na construção civil, a utilização do resíduo de cerâmica vermelha, moído e peneirado até totalmente passante na peneira com abertura de 0,075 mm (200 mesh), como uma adição mineral (pozolana), é possível para a produção de cimento Portland composto com pozolana (CPII Z) e de cimento Portland pozolânico (CPIV). Assim, esses dois tipos de cimento foram produzidos em laboratório, combinando a pozolana obtida a partir do resíduo de cerâmica vermelha com o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI) disponível comercialmente. O CPV ARI foi selecionado por conter o maior teor de clínquer dentre os cimentos disponíveis e, assim, consistir em um cimento “mais puro” em termos de adições minerais, além de apresentar uma moagem mais fina que o torna mais reativo.

Para a produção do CPII Z, a pozolana foi combinada com o CPV ARI utilizando 12% de pozolana e 88% de CPV ARI, em massa. No caso do CPIV, o cimento também foi produzido pela combinação da pozolana com o CPV ARI, porém utilizando teores de 35% para a pozolana e 65% de CPV ARI, em massa. A fim de obter uma mistura homogênea entre os materiais, a pozolana e o CPV ARI foram misturados a seco em um homogeneizador em Y durante 20 min. Este mesmo procedimento de homogeneização foi adotado tanto para a produção do CPII Z quanto para a produção do CPIV em laboratório. As amostras dos cimentos compostos (CPII Z e CPIV), produzidos em laboratório e disponível comercialmente, foram identificadas separadamente em função do material de origem do resíduo de cerâmica vermelha (bloco de vedação e telha cerâmica), conforme apresentado na Tabela I.

Tabela I - Identificação das amostras de cimentos compostos utilizadas no estudo.

[Table I - Identification of the samples of blended cements considered in the study.]

Identificação	Origem do resíduo	Descrição
CPII Z-R	Referência	CPII Z disponível comercialmente
CPII Z-B	Bloco de vedação	CPII Z produzido em laboratório a partir da combinação da pozolana com CPV ARI
CPII Z-T	Telha	
CPIV-R	Referência	CPIV disponível comercialmente
CPIV-B	Bloco de vedação	CPIV produzido em laboratório a partir da combinação da pozolana com CPV ARI
CPIV-T	Telha	

Obs.: para a produção do CPII Z-B e CPII Z-T, a pozolana obtida a partir do resíduo de cerâmica vermelha foi combinada com o CPV ARI utilizando 12% de pozolana e 88% de CPV ARI; no caso do CPIV-B e CPIV-T, o cimento também foi produzido pela combinação da pozolana obtida a partir do resíduo de cerâmica vermelha com o CPV ARI, porém utilizando 35% de pozolana e 65% de CPV ARI (% em massa).

Ensaio de caracterização dos cimentos compostos

A avaliação dos cimentos compostos produzidos em laboratório e disponível comercialmente foi realizada por meio da determinação de suas características químicas e físicas, e propriedades mecânicas. As características químicas dos cimentos foram determinadas por meio de análise química a fim de se obter sua composição química, tendo como resultado os teores de anidrido silícico (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO), óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O), anidrido sulfúrico (SO_3), anidrido carbônico (CO_2), sulfeto (S^{2-}), perda ao fogo e resíduo insolúvel. O ensaio foi realizado de acordo com procedimentos de ensaio internos ao IPT, elaborados com base em diretrizes de normas brasileiras [15-22].

Devido ao elevado teor de equivalente alcalino (Na_2O equivalente), determinado a partir dos ensaios de análise química dos cimentos compostos produzidos em laboratório, foram realizados ensaios adicionais para a avaliação da potencialidade de reação álcali-agregado caso esses cimentos sejam usados em combinação com agregados reativos na produção de concreto. Para isso, foi produzida uma argamassa com traço padrão utilizando o cimento composto produzido em laboratório e um agregado classificado como potencialmente reativo (de acordo com a NBR 15577-1:2008 [27] em combinação com o cimento padrão CPV ARI). A reatividade álcali-agregado foi avaliada a partir do método de ensaio acelerado em barras de argamassa, de acordo com o procedimento estabelecido na NBR 15577-5:2008 [28].

As características físicas dos cimentos foram definidas a partir da determinação da massa específica, área superficial específica, água da pasta de consistência normal, tempos de início e fim de pega, e estabilidade de volume, por meio dos seguintes métodos de ensaio: i) massa específica: ensaio realizado com o auxílio do frasco volumétrico de Le Chatelier, seguindo as especificações da NBR NM 23:2001 [24]; ii) área superficial específica: ensaio realizado a partir do método de permeabilidade ao ar, utilizando um aparelho Blaine (Pav-test), de acordo com a NBR NM 76:1998 [25]; iii) água da pasta de consistência normal: ensaio realizado por meio do aparelho de Vicat, no qual foi medida a profundidade de penetração da sonda de Tetmajer na pasta de cimento, seguindo as especificações da NBR NM 43:2003 [29]; iv) tempos de início e fim de pega: ensaio realizado com o auxílio do aparelho de Vicat, que define os tempos de início e fim de pega em função da resistência à penetração da pasta de cimento, de acordo com a NBR NM 65:2003 [30]; v) expansibilidade Le Chatelier: ensaio realizado de acordo com as diretrizes da NBR 11582:2012 [31], medindo-se o afastamento entre as extremidades da agulha de Le Chatelier, nas condições a frio e a quente.

O comportamento mecânico dos cimentos foi avaliado de acordo com o procedimento estabelecido na NBR 7215:1996 [32]. O método de ensaio consistiu na determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, produzidos com uma argamassa de traço padrão, composto de uma parte de cimento, três partes de areia normalizada e relação água/cimento de

0,48 (ou seja, 1:3,00:0,48, em massa). A argamassa foi preparada por meio de um misturador mecânico, seguindo um procedimento de mistura padronizado. Imediatamente após a mistura, os corpos de prova foram moldados e, na sequência, os moldes foram colocados em câmara úmida por um período de 24 h. Após a desmoldagem, o processo de cura continuou até as respectivas idades de ensaio por meio de imersão dos corpos de prova em água saturada com cal. A resistência à compressão foi determinada nas idades de 3, 7 e 28 dias, sendo ensaiados quatro corpos de prova em cada idade. As extremidades dos corpos de prova foram capeadas para as determinações individuais e posterior cálculo da resistência média e do desvio máximo relativo. Também foi calculada a resistência à compressão relativa em cada idade (RCS_j), definida como a relação entre a resistência à compressão em uma determinada idade j (f_{c_j}) e a resistência da argamassa de referência (produzida com o cimento comercial) na mesma idade ($f_{c_{\text{ref}}}$), isto é, $\text{RCS}_j = f_{c_j}/f_{c_{\text{ref}}}$ [7].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização da pozolana

As características do material obtido a partir da moagem de resíduos de cerâmica vermelha são apresentadas na Fig. 1 e Tabelas II e III. Em termos de distribuição granulométrica, verificou-se que as pozolanas produzidas apresentaram distribuições granulométricas semelhantes. O tamanho obtido para 50% das partículas (d_{50}) das amostras avaliadas foi de 6,57 e 6,58 μm para as pozolanas obtidas a partir do resíduo de bloco de vedação e telha, respectivamente. Quando comparado à distribuição granulométrica do cimento CPV ARI, em que o tamanho d_{50} foi de 8,11 μm , verificou-se que as pozolanas possuíram distribuição granulométrica com maior quantidade de partículas finas que o cimento. Verificou-se que o processo de moagem adotado para a obtenção de pozolana, com vista à sua utilização como adição mineral para produção de ci-

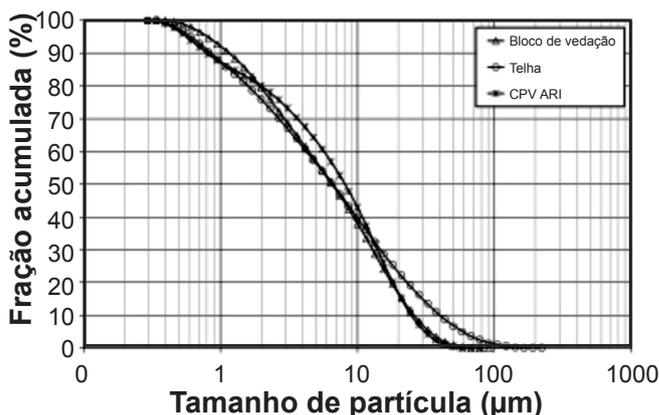


Figura 1: Curvas de distribuição granulométrica das pozolanas obtidas a partir do resíduo de cerâmica vermelha e do CPV ARI utilizados na produção dos cimentos compostos em laboratório.

[Figure 1: Particle size curves of the distribution curves of the pozzolans obtained from red clay industry waste and CPV ARI cement used in the production of blended cements in the laboratory.]

Tabela II - Resultados da análise química (% em massa) dos materiais pozzolânicos obtidos a partir do resíduo de cerâmica vermelha.

[Table II - Results of chemical analysis (wt%) for pozzolanic materials obtained from red clay industry waste.]

Determinação	Limite NBR 12653 [33]	Bloco de vedação	Telha
Anidrido silícico (SiO ₂)	–	59,6	60,4
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	–	22,1	21,8
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	–	8,39	8,17
Óxido de cálcio (CaO)	–	0,24	0,29
Óxido de magnésio (MgO)	–	0,30	0,29
Óxido de sódio (Na ₂ O)	–	0,15	0,14
Óxido de potássio (K ₂ O)	–	1,90	1,60
Óxido de manganês (Mn ₂ O ₃)	–	0,16	0,08
Óxido de titânio (TiO ₂)	–	1,73	1,88
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70%	90,1	90,4
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	≤ 4%	< 0,10	< 0,10
Perda ao fogo	≤ 10%	1,59	2,37
Equivalente alcalino em Na ₂ O ⁽¹⁾	–	1,40	1,19
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	≤ 1,5%	–	–

Nota: ⁽¹⁾ equivalente alcalino (em Na₂O) = %Na₂O + 0,658 x %K₂O.

Tabela III - Resultados dos ensaios físicos e mecânicos dos materiais pozzolânicos obtido a partir do resíduo de cerâmica vermelha.

[Table III - Results of physical and mechanical tests for pozzolanic materials obtained from red clay industry waste.]

Identificação da Amostra	Massa específica (g/cm ³)	Área superficial específica (cm ² /g)	Índice de atividade pozzolânica com cal					Limite NBR 12653 [33] (MPa)
			Resistência à compressão (MPa)				Desvio relativo máximo (%)	
			CP 1	CP 2	CP 3	Média		
Bloco de vedação	2,70	12750	6,8	7,4	7,4	7,2	5,6	≥ 6
Telha	2,65	13990	7,5	7,4	7,9	7,6	3,9	

mento, permitiu a obtenção de um material com propriedades químicas, físicas e mecânicas que o caracterizou como um material pozzolânico e, assim, podendo ser utilizado para esta finalidade. Cabe ressaltar que o material de origem do resíduo de cerâmica vermelha (bloco de vedação ou telha) não interferiu nas propriedades das pozolanas produzidas.

Caracterização do cimento “base” CPV ARI

O cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI), disponível comercialmente, utilizado na produção dos cimentos compostos também foi avaliado. A distribuição granulométrica, as características físicas e as propriedades

Tabela IV - Resultados das características físicas do cimento CPV ARI utilizado na produção dos cimentos composto no laboratório.

[Table IV - Results of physical tests for the CPV ARI cement used in the production of blended cements in the laboratory.]

Característica física	Resultado	Limite NBR 5733 [34]
Massa específica (g/cm ³)	3,02	–
Área superficial específica (m ² /kg)	527	≥ 300
Água para pasta normal (% massa do cimento)	31,7	–
Início de pega (min)	175	≥ 60
Fim de pega (min)	240	≤ 600
Expansibilidade a frio (mm)	0,5	≤ 5,0
Expansibilidade a quente (mm)	0,0	≤ 5,0

Tabela V - Resultados de resistência à compressão (MPa) do cimento CPV ARI utilizado na produção dos cimentos composto no laboratório.

[Table V - Results of compressive strength (MPa) for the CPV ARI cement used in the production of blended cements in the laboratory.]

Idade (dia)	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	Média	DRM (%)	Limite NBR 5733 [34]
1	20,9	19,9	20,5	21,0	20,6	3,4	≥ 14,0
3	40,5	42,1	40,6	40,8	41,0	2,7	≥ 24,0
7	49,1	48,3	49,1	47,9	48,6	1,4	≥ 34,0
28	53,1	52,9	51,1	52,5	52,4	2,5	-

DRM: desvio relativo máximo, ≤ 6%.

mecânicas deste cimento são apresentadas na Fig. 1 e nas Tabelas IV e V.

Caracterização dos cimentos compostos

Ensaio químicos: os resultados da análise química dos cimentos compostos são apresentados nas Tabelas VI e VII. A composição química dos cimentos compostos produzidos em laboratório deve estar em conformidade com os requisitos químicos estabelecidos na NBR 11578:1991 [35] e na NBR 5736:1991 [36] para o cimento CII Z e

CPIV, respectivamente. Nos casos do CII Z e CIV, todos os requisitos de norma também foram atendidos, isto é, os teores de perda ao fogo, óxido de magnésio (MgO), anidrido sulfúrico (SO₃), anidrido carbônico (CO₂), resíduo insolúvel e material carbonático estiveram abaixo ou dentro dos limites especificados em norma. Quando comparado ao cimento de referência (CII Z-R), verificou-se que, de uma maneira geral, os cimentos compostos com pozolana produzidos em laboratório (CII Z-B e CII Z-T), independente do material de origem do resíduo, apresentaram composição química semelhante ao CII Z-R. Porém, esses cimentos apresentaram menores teores de óxido de magnésio (MgO) e material carbonático, enquanto os teores de anidrido sulfúrico (SO₃), equivalente alcalino (Na₂O equivalente) e pozolana foram mais elevados. No caso do cimento pozolânico, de maneira geral, os cimentos produzidos em laboratório (CIV-B e CIV-T) apresentaram composição química semelhante ao cimento de referência (CIV-R), porém com teores de anidrido sulfúrico (SO₃) e de equivalente alcalino (Na₂O equivalente) mais elevados, independente do material de origem do resíduo.

Um aspecto que merece atenção especial está relacionado com o teor de equivalente alcalino (Na₂O equivalente) dos cimentos compostos produzidos em laboratório. De acordo com [3], cimentos Portland contendo mais do que 0,60% de Na₂O equivalente, quando usados em combinação com agregados reativos, podem causar expansão devido à reação álcali-agregado. Sendo assim, na prática, um teor de

Tabela VI - Resultados dos ensaios químicos dos cimentos CII Z considerados no estudo.

[Table VI - Results of chemical analyses for the CII Z cements considered in the study.]

Determinação	Limite NBR 11578 [35]	CII Z-R	CII Z-B	CII Z-T
Perda ao fogo (PF)	≤ 6,5	4,68	4,05	3,82
Anidrido silícico (SiO ₂)	-	19,9	23,8	23,4
Óxido de cálcio (CaO)	-	56,0	54,0	54,9
Óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,5	5,78	2,30	2,05
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	-	2,71	3,23	3,29
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	-	5,66	6,35	6,52
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	≤ 4,0	2,48	3,64	3,67
Óxido de sódio (Na ₂ O)	-	0,23	0,41	0,40
Óxido de potássio (K ₂ O)	-	1,09	0,95	0,91
Equivalente alcalino (em Na ₂ O) ⁽¹⁾	-	0,94	1,03	1,00
Sulfeto (S ²⁻)	-	0,09	n.d.	n.d.
Óxido de cálcio livre (CaO)	-	1,00	1,23	1,30
Resíduo insolúvel (RI)	≤ 16,0	2,16	12,1	11,9
Anidrido carbônico (CO ₂)	≤ 5,0	3,61	2,09	1,97
Pozolana ⁽²⁾	6 - 14	2,16 ⁽³⁾	12,1	11,9
Material carbonático ⁽⁴⁾	0 - 10	8,19	4,74	4,47

Notas: n.d. = não detectado; ⁽¹⁾ equivalente alcalino (em Na₂O) = %Na₂O + 0,658 x %K₂O; ⁽²⁾ estimado pelo teor de resíduo insolúvel (RI, 1:50); ⁽³⁾ por limitação do método de ensaio, é possível que o teor esteja subestimado se a pozolana for parcialmente solúvel como, por exemplo, escórias siderúrgicas ácidas previstas em normas [35, 36]; ⁽⁴⁾ valor estimado pelo cálculo estequiométrico: %CaCO₃ = %CO₂ x 2,27.

Tabela VII - Resultados dos ensaios químicos (% em massa) dos cimentos CPIV considerados no estudo.
 [Table VII - Results of chemical analyses (wt%) for the CPIV cements considered in the study.]

Determinação	Limite NBR 5736 [36]	CPIV-R	CPIV-B	CPIV-T
Perda ao fogo (PF)	≤ 4,5	4,64	3,10	3,40
Anidrido silícico (SiO ₂)	–	35,0	33,5	33,8
Óxido de cálcio (CaO)	–	41,0	41,2	40,5
Óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,5	4,03	1,25	1,85
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	–	3,64	4,89	4,77
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	–	10,0	10,4	10,3
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	≤ 4,0	1,39	2,72	2,71
Óxido de sódio (Na ₂ O)	–	0,23	0,34	0,36
Óxido de potássio (K ₂ O)	–	0,91	1,11	1,03
Equivalente alcalino (em Na ₂ O) ⁽¹⁾	–	0,82	1,07	1,03
Sulfeto (S ²⁻)	–	0,03	n.d.	n.d.
Óxido de cálcio livre (CaO)	–	2,32	0,98	0,97
Resíduo insolúvel (RI)	–	33,1	33,4	33,5
Anidrido carbônico (CO ₂)	≤ 3,0	1,17	1,34	1,39
Pozolana ⁽²⁾	15 - 50	33,1	33,4	33,5
Material carbonático ⁽³⁾	0 - 5	2,66	3,04	3,16

Notas: n.d. = não detectado; ⁽¹⁾ equivalente alcalino (em Na₂O) = %Na₂O + 0,658 x %K₂O; ⁽²⁾ estimado pelo teor de resíduo insolúvel (RI, 1:50); ⁽³⁾ valor estimado pelo cálculo estequiométrico: %CaCO₃ = %CO₂ x 2,27.

equivalente alcalino igual ou inferior a 0,60% é considerado insuficiente para causar danos devido à reação álcali-agregado, independente do tipo de agregado reativo em concretos convencionais. Para os cimentos compostos produzidos em laboratório os teores de Na₂O equivalente variaram entre 1,00 e 1,03% para o CPII Z e entre 1,03 e 1,07% para o CPIV. Dessa forma, foram realizados ensaios adicionais para a avaliação da potencialidade de reação álcali-agregado caso esses cimentos sejam usados em combinação com agregados reativos na produção de concreto. Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 2. A utilização de cimentos compostos (CPII Z e CPIV) pode ser considerada uma medida de mitigação geralmente adequada para quando do uso de agregados potencialmente reativos na produção de concreto. A NBR 15577-1:2008 [27] considera comprovada a mitigação da reação álcali-agregado quando o resultado do ensaio acelerado em barras de argamassa for menor que 0,10% aos 16 dias. Neste contexto, verificou-se que, apesar do elevado teor de álcalis presente nos cimentos compostos produzidos em laboratório, sua utilização pode ser considerada como uma medida mitigadora da reação álcali-agregado. Este comportamento também foi observado em [7].

Ensaio físico: as características físicas dos cimentos compostos produzidos em laboratório foram definidas a partir da determinação da massa específica, área superficial específica, água da pasta de consistência normal, tempos de início e fim de pega, e estabilidade de volume. Os resultados obtidos para os cimentos compostos são apresentados nas Tabelas VIII e IX. Quando comparados às especificações e limites estabelecidos nas normas correspondentes de cimento Portland composto com pozolana (CPII Z) e

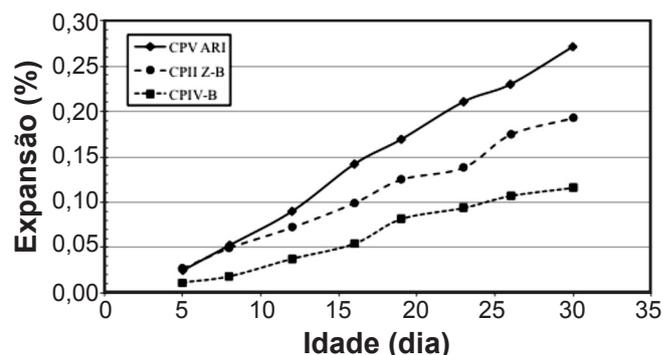


Figura 2: Avaliação da potencialidade de reação álcali-agregado dos cimentos compostos produzidos em laboratório: expansão de barras de argamassa ao longo do tempo.

[Figure 2: Evaluation of the alkali-aggregate reaction potentiality of blended cements produced in the laboratory: the mortar bars expansion over time.]

de cimento Portland pozolânico (CPIV), respectivamente, NBR 11578:1991 [35] e NBR 5736:1991 [36], verificou-se que ambos os cimentos produzidos em laboratório atenderam aos requisitos físicos das normas correspondentes. Observou-se também que o material de origem do resíduo de cerâmica vermelha praticamente não influenciou nas características dos cimentos produzidos em laboratório. Quando comparado ao cimento de referência (CPII Z-R), verificou-se que os cimentos compostos com pozolana produzidos em laboratório (CPII Z-B e CPII Z-T) apresentaram maior finura associada a uma maior área superficial específica. Isso resultou no aumento da quantidade de água necessária para uma consistência normal (padrão), porém sem interferir

Tabela VIII - Resultados das características físicas dos cimentos CII Z considerados no estudo.

[Table VIII - Results of physical tests for the CII Z cements considered in the study.]

Característica física	CII Z-R	CII Z-B	CII Z-T	Limite NBR 11578 [35]
Massa específica (g/cm ³)	3,06	3,02	3,00	–
Área superficial específica (m ² /kg)	446	607	628	Classe 25 ≥ 240 Classe 32 ≥ 260 Classe 40 ≥ 280
Água para pasta normal (% massa do cimento)	23,7	33,1	33,1	–
Início de pega (min)	280	275	290	≥ 60
Fim de pega (min)	375	375	390	≤ 600
Expansibilidade a frio (mm)	0,5	0,0	0,0	≤ 5,0
Expansibilidade a quente (mm)	0,0	0,0	0,0	≤ 5,0

Tabela IX - Resultados das características físicas dos cimentos CIII considerados no estudo.

[Table IX - Results of physical tests for the CIII cements considered in the study.]

Característica física	CIII-R	CIII-B	CIII-T	Limite NBR 5736 [36]
Massa específica (g/cm ³)	2,91	2,93	2,90	–
Área superficial específica (m ² /kg)	394	894	900	–
Água para pasta normal (% massa do cimento)	29,0	37,1	35,3	–
Início de pega (min)	275	225	165	≥ 60
Fim de pega (min)	345	390	390	≤ 720
Expansibilidade a frio (mm)	0,0	0,0	0,0	≤ 5,0
Expansibilidade a quente (mm)	0,0	0,0	0,0	≤ 5,0

no tempo de pega. No caso do cimento pozolânico, verificou-se também que os cimentos produzidos em laboratório (CIII-B e CIII-T) apresentaram maior finura associada a uma elevada área superficial específica. Mais uma vez isso resultou no aumento da quantidade de água necessária para uma consistência normal (padrão), porém com redução do tempo de início de pega quando comparado ao cimento pozolânico de referência (CIII-R). Assim, em função das características físicas, ambos os cimentos compostos produzidos em laboratório mostraram um maior potencial para reação nas primeiras idades do que os cimentos comercialmente disponíveis.

Ensaio mecânico: o comportamento mecânico dos cimentos compostos produzidos em laboratório foi avaliado por meio da determinação da resistência à compressão, cujos resultados são apresentados nas Tabelas X e XI e nas Figs. 3 e 4. Quando considerada a evolução da resistência à compressão desses cimentos ao longo do tempo (até 28 dias de idade), verificou-se que houve um aumento crescente da resistência. Para o cimento Portland composto com pozolana (CII Z), a NBR 11578:1991 [35] especifica três classes de resistência para este tipo de cimento: 25, 32 e 40 MPa. Assim, quando avaliado o desempenho mecânico destes cimentos, estes são os valores mínimos da resistência à compressão que esses materiais devem apresentar aos 28 dias de idade, dependendo da classe de resistência especificada. Analisando os resultados dos ensaios mecânicos obtidos para os cimentos compostos com pozolana produzidos em laboratório, CII Z-B e CII Z-T (Tabela X e Fig. 3), verificou-se que aos 28 dias

de idade os valores da resistência à compressão de ambos os cimentos foram superiores ao valor mínimo estabelecido para a maior classe de resistência especificada para este tipo de cimento (40 MPa). Verificou-se também que os resultados obtidos para ambos os cimentos compostos produzidos em laboratório foram semelhantes, indicando que o material de origem do resíduo não interferiu nas propriedades mecânicas do cimento.

No caso do cimento Portland pozolânico (CIII), a NBR 5736:1991 [36] especifica apenas duas classes de resistência para este tipo de cimento: 25 e 32 MPa, que correspondem aos valores mínimos da resistência à compressão que esses cimentos devem apresentar aos 28 dias de idade, dependendo da classe de resistência especificada. A partir dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos dos cimentos pozolânicos produzidos em laboratório, CIII-B e CIII-T (Tabela XI e Fig. 4), verifica-se que os valores da resistência à compressão desses cimentos aos 28 dias de idade foram superiores ao valor mínimo estabelecido para a maior classe de resistência especificada para este tipo de cimento (32 MPa). Novamente, verificou-se que os resultados obtidos para ambos os cimentos compostos produzidos foram semelhantes, indicando que o material de origem do resíduo não interferiu nas propriedades mecânicas do cimento.

Quando comparado aos cimentos de referência (CII Z-R e CIII-R), verificou-se que todos os cimentos compostos produzidos em laboratório (CII Z-B, CII Z-T, CIII-B e CIII-T) apresentaram valores de resistência à compressão superiores em todas as idades de ensaio. Ao

analisar a resistência à compressão relativa em cada idade (RCS_j), apresentada nas Tabelas X e XI, é possível observar que os cimentos compostos produzidos em laboratório apresentaram valores de resistência até 50% maiores que

os respectivos cimentos compostos comerciais. Apesar de não se ter a informação sobre o tipo e a quantidade de material pozolânico utilizado na produção dos cimentos compostos comerciais (CPII Z-R e CPIV-R), sabe-se que,

Tabela X - Resultados de resistência à compressão (MPa) dos cimentos CPII Z considerados no estudo.
[Table X - Results of compressive strength (MPa) for the CPII Z cements considered in the study.]

Idade (dia)	Corpo de prova	CPII Z-R	CPII Z-B	CPII Z-T	Limite NBR 11578 [35]
3	CP 1	25,2	39,7	41,2	Classe 25 ≥ 8,0 Classe 32 ≥ 10,0 Classe 40 ≥ 15,0
	CP 2	25,3	39,2	42,2	
	CP 3	26,6	40,0	41,7	
	CP 4	25,3	41,1	40,5	
	Média	25,6	40,0	41,4	
	DRM (%)	3,9	2,8	2,2	
	RCS ₃	---	1,56	1,62	
7	CP 1	30,7	48,5	48,2	Classe 25 ≥ 15,0 Classe 32 ≥ 20,0 Classe 40 ≥ 25,0
	CP 2	32,1	48,8	48,6	
	CP 3	31,4	47,0	49,1	
	CP 4	31,9	47,4	49,3	
	Média	31,5	47,9	48,8	
	DRM (%)	2,5	1,9	1,2	
	RCS ₇	---	1,52	1,55	
28	CP 1	41,2	56,1	54,4	Classe 25 ≥ 25,0 Classe 32 ≥ 32,0 Classe 40 ≥ 40,0
	CP 2	40,5	56,2	53,5	
	CP 3	41,3	56,4	53,8	
	CP 4	40,5	57,5	54,4	
	Média	40,9	56,6	54,0	
	DRM (%)	1,0	1,6	0,9	
	RCS ₂₈	---	1,38	1,32	

DRM: desvio relativo máximo, ≤ 6%.

Tabela XI - Resultados de resistência à compressão (MPa) dos cimentos CPIV considerados no estudo.
[Table XI - Results of compressive strength (MPa) for the CPIV cements considered in the study.]

Idade (dia)	Corpo de prova	CPIV-R	CPIV-B	CPIV-T	Limite NBR 5736 [21]
3	CP 1	17,9	28,0	26,8	Classe 25 ≥ 8,0 Classe 32 ≥ 10,0
	CP 2	17,9	27,3	27,0	
	CP 3	17,6	29,0	26,0	
	CP 4	18,4	27,6	27,3	
	Média	18,0	28,0	26,8	
	DRM (%)	2,2	3,6	3,0	
	RCS ₃	---	1,56	1,49	
7	CP 1	28,4	39,8	39,3	Classe 25 ≥ 15,0 Classe 32 ≥ 20,0
	CP 2	26,9	38,9	38,0	
	CP 3	26,4	39,4	38,8	
	CP 4	27,0	39,0	39,3	
	Média	27,2	39,3	38,9	
	DRM (%)	4,4	1,3	2,3	
	RCS ₇	---	1,44	1,43	
28	CP 1	36,1	48,5	53,1	Classe 25 ≥ 25,0 Classe 32 ≥ 32,0
	CP 2	36,5	47,6	52,1	
	CP 3	36,7	48,5	52,9	
	CP 4	37,6	48,4	54,2	
	Média	36,7	48,3	53,1	
	DRM (%)	2,5	1,4	2,1	
	RCS ₂₈	---	1,32	1,45	

DRM: desvio relativo máximo, ≤ 6%.

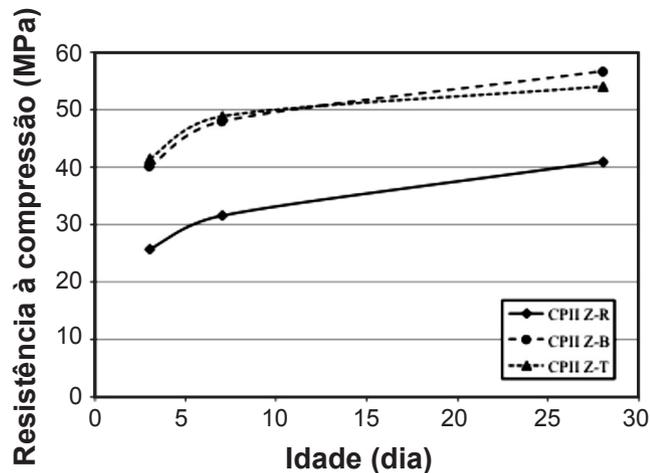


Figura 3: Evolução da resistência à compressão dos cimentos CII Z ao longo do tempo.

[Figure 3: Evolution of the compressive strength of the CII Z cements over time.]

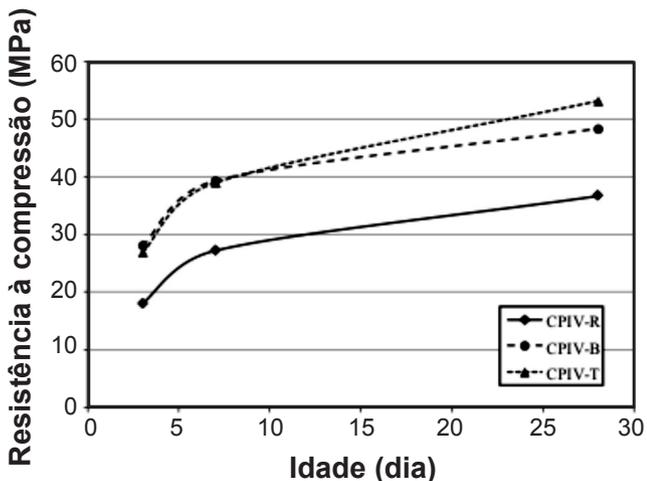


Figura 4: Evolução da resistência à compressão dos cimentos CII V ao longo do tempo.

[Figure 4: Evolution of the compressive strength of the CII V cements over time.]

devido à reação pozolânica, há a contribuição da adição mineral para com o desempenho mecânico dos cimentos com o tempo. Esse fato pode ser observado com a redução da resistência à compressão relativa ao longo do tempo, que também foi observado nos estudos desenvolvidos em [5, 7]. Assim, em função das propriedades mecânicas obtidas, os cimentos compostos produzidos em laboratório mostraram-se adequados para utilização, atendendo aos requisitos mecânicos estabelecidos nas normas correspondentes.

CONCLUSÕES

Os cimentos compostos CII Z e CII V, produzidos em laboratório, atenderam aos requisitos químicos e físicos das normas correspondentes. Do ponto de vista do desempenho mecânico, verificou-se que a resistência à compressão desses cimentos foi superior ao valor mínimo estabelecido

para a maior classe de resistência especificada em norma para cada tipo de cimento, com pequena dispersão nos resultados obtidos. Cabe ressaltar que os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos cimentos compostos não foram influenciados pelo material de origem do resíduo de cerâmica vermelha, ou seja, se a pozolana foi obtida a partir de resíduos da produção de blocos de vedação ou de telhas cerâmicas. Todos os cimentos compostos produzidos em laboratório apresentaram teor de equivalente alcalino que os caracteriza como cimentos de elevada alcalinidade. Dessa forma, foram realizados ensaios complementares para avaliação da potencialidade de reação álcali-agregado quando esses cimentos forem usados em combinação com um agregado potencialmente reativo na produção de concreto. Com base nos resultados do ensaio acelerado em barras de argamassa, verificou-se que, apesar do elevado teor de álcalis desses cimentos, sua utilização pode ser considerada como uma medida mitigadora da reação quando da presença de agregados potencialmente reativos no concreto. Ao comparar com o cimento Portland composto com pozolana e o cimento Portland pozolânico comercialmente disponíveis, verificou-se que os cimentos compostos produzidos em laboratório apresentaram maior finura associada a uma elevada área superficial específica. Isso resultou no aumento da demanda de água e, em alguns casos, na redução do tempo de início de pega do cimento. Do ponto de vista mecânico, para os teores de pozolana considerados na produção dos cimentos compostos em laboratório, não foi verificado o comprometimento do desempenho mecânico desses cimentos, uma vez que os cimentos compostos produzidos em laboratório apresentaram resistência à compressão superior ao de referência em todas as idades de ensaio. O teor de pozolana de 35% corresponde ao teor máximo de pozolana incorporado ao cimento composto considerado no presente estudo. Assim, em função das propriedades obtidas nos diferentes ensaios de caracterização, os cimentos compostos produzidos em laboratório mostraram-se adequados para utilização na construção civil, atendendo aos requisitos químicos, físicos e mecânicos estabelecidos nas normas correspondentes. Este fato, associado à proximidade geográfica entre as indústrias ceramistas e as indústrias cimenteiras faz da pozolana obtida a partir de resíduos de cerâmica vermelha uma alternativa em potencial para uso como adição mineral na produção de cimento Portland. Isso pode resultar em vantagens ambientais, econômicas e tecnológicas, permitindo a reciclagem de um subproduto da indústria de cerâmica vermelha que, caso contrário, seria depositado em aterros. Cabe ressaltar que, dependendo do teor de pozolana adicionado ao cimento, pode ocorrer alteração na coloração dos materiais à base de cimentos compostos com a adição mineral obtida a partir do resíduo de cerâmica vermelha. Assim, se houver a demanda por uma estrutura de concreto aparente, onde se deseja explorar a cor cinza do material, a utilização desse cimento pode ser inviabilizada devido à tonalidade avermelhada promovida pela pozolana. Porém, em aplicações em que a coloração do material não é uma preocupação, o cimento

composto produzido no laboratório pode ser uma alternativa interessante, uma vez que a alteração da cor não interferiu nem na reatividade do material pozolânico produzido, nem no desempenho dos cimentos compostos com essa adição mineral.

REFERÊNCIAS

- [1] A.F. Battagin, I.L.S. Battagin, O cimento Portland no Brasil, In: G. C. ISAIA (Ed.), *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*, 2 ed., Inst. Brasil. Concr., S. Paulo/SP (2010) 761-790.
- [2] A.F. Battagin, Cimento Portland, In: G. C. ISAIA (Ed.), *Concreto: ciência e tecnologia*, Inst. Brasil. Concr., S. Paulo/SP (2011) 185-232.
- [3] P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*, 2ª Ed., Inst. Brasil. Concr., S. Paulo/SP (2014).
- [4] M. Nehdi, S. Mindess, P.C. Aïtcin, “Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles”, *Cem. Concr. Res.* **28**, 5 (1998) 687-697.
- [5] M.A. Mas, J. Monzó, J. Payá, L. Reig, M. V. Borrachero, “Ceramic tiles waste as replacement material in Portland cement” (2015), *Adv. Cem. Res.* **28**, 4 (2016) 221-232.
- [6] N. Ay, M. Ünal, “The use of waste ceramic tile in cement production”, *Cem. Concr. Res.* **30**, 3 (2000) 497-499.
- [7] R.D. Toledo Filho, J.P. Gonçalves, B.B. Americano, E.M.R. Fairbairn, “Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil”, *Cem. Concr. Res.* **37**, 9 (2007) 1357-1365.
- [8] L. Reig, M.M. Tashima, M.V. Borrachero, J. Monzó, C.R. Cheeseman, J. Payá, “Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste”, *Constr. Build. Mater.* **43** (2013) 98-106.
- [9] J. Silva, J. Brito, R. Veiga, “Incorporation of fine ceramics in mortars”, *Constr. Build. Mater.* **23**, 1 (2009) 556-564.
- [10] F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, “Reusing ceramic wastes in concrete”, *Constr. Build. Mater.* **24**, 5 (2010) 832-838.
- [11] L.A. Pereira-de-Oliveira, J.P. Castro-Gomes, P.M.S. Santos, “The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components”, *Constr. Build. Mater.* **1** (2012) 197-203.
- [12] A.V. Bahiense, R.T. Manhães, J. Alexandre, G.C. Xavier, S.N. Monteiro, C.M.F. Vieira, “Utilização do planejamento experimental na incorporação do resíduo da indústria cerâmica em argamassas para obtenção da capacidade de retenção de água”, *Cerâmica* **54**, 332 (2008) 395-403.
- [13] A.L. Castro, E. Garcia, R.F.C. Santos, V.A. Quarcioni, A.C. Camargo, “Avaliação da reatividade de pozolana obtida a partir de resíduos de cerâmica vermelha”, *Anais 58º Congr. Brasil. Cerâm.*, Bento Gonçalves/RS (2014) 3034-3045.
- [14] E. Garcia, M. Cabral Jr., V.A. Quarcioni, F.F. Chotoli, “Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais pólos ceramistas do Estado de S. Paulo”, *Cerâmica* **61**, 358 (2015) 251-258.
- [15] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR NM 11-2, “Cimento Portland: análise química: determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 2: método” ABNT, Rio de Janeiro (2012).
- [16] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR NM 13, “Cimento Portland: análise química: determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol”, Rio de Janeiro (2012).
- [17] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR NM 15, “Cimento Portland: análise química: determinação de resíduo insolúvel”, Rio de Janeiro (2012).
- [18] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR NM 16, “Cimento Portland: análise química: determinação de anidrido sulfúrico”, Rio de Janeiro (2012).
- [19] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR NM 18, “Cimento Portland: análise química: determinação de perda ao fogo”, Rio de Janeiro (2012).
- [20] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR NM 19, “Cimento Portland: análise química: determinação de enxofre na forma de sulfeto”, Rio de Janeiro (2012).
- [21] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR NM 20, “Cimento Portland e suas matérias primas: análise química: determinação de dióxido de carbono por gasometria”, Rio de Janeiro (2012).
- [22] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR NM 22, “Cimento Portland: análise química: método de arbitragem”, Rio de Janeiro (2012).
- [23] International Organization for Standardization (ISO), ISO 13320, “Particle size analysis: laser diffraction methods” (2009).
- [24] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR NM 23, “Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica”, Rio de Janeiro (2001).
- [25] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR NM 76, “Cimento Portland: determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)”, Rio de Janeiro (1998).
- [26] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 5751, “Materiais pozolânicos: determinação da atividade pozolânica: índice de atividade pozolânica com cal: método de ensaio”, Rio de Janeiro (2012).
- [27] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 15577-1, “Agregados: reatividade álcali-agregado - Parte 1: guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto”, Rio de Janeiro (2008).
- [28] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 15577-5, “Agregados: reatividade álcali-agregado - Parte 5: determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado”, Rio de Janeiro (2008).
- [29] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR NM 43, “Cimento Portland: determinação da pasta de consistência normal”, Rio de Janeiro (2003).
- [30] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR NM 65, “Cimento Portland: determinação do tempo de pega”, Rio de Janeiro (2003).
- [31] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 11582, “Cimento Portland: determinação da

expansibilidade Le Chatelier”, Rio de Janeiro (2012).

[32] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 7215, “Cimento Portland: determinação da resistência à compressão”, Rio de Janeiro (1996).

[33] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 12653, “Materiais pozolânicos: requisitos”, Rio de Janeiro (2012).

[34] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT),

NBR 5733, “Cimento Portland de alta resistência inicial”, Rio de Janeiro (1991).

[35] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 11578, “Cimento Portland composto: especificação”, Rio de Janeiro (1991).

[36] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 5736, “Cimento Portland pozolânico”, Rio de Janeiro (1991).

(Rec. 07/01/2016, Rev. 24/04/2016, Ac. 20/06/2016)