

# Avaliação do potencial reativo de adições de resíduos de blocos de cerâmica vermelha e de concreto cominuído de RCD em matriz cimentícia

## *(Evaluation of the reactive potential of additions of red ceramic waste and comminuted concrete of CDW in cement matrix)*

F. Brekailo<sup>1\*</sup>, Eduardo Pereira<sup>1</sup>, Elias Pereira<sup>1</sup>, J. Hoppe Filho<sup>2</sup>, M. H. F. de Medeiros<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Ponta Grossa, Departamento de Engenharia Civil, Av. Carlos Cavalcanti 4748, 84030-900, Ponta Grossa, PR, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Oeste da Bahia, Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias, Barreiras, BA, Brasil

<sup>3</sup>Universidade Federal do Paraná, Departamento de Construção Civil, Curitiba, PR, Brasil

### Resumo

Neste trabalho avaliou-se o potencial reativo de adições de resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e de concreto de RCD, além de filer calcário para referência. Avaliou-se o potencial pozzolânico das adições por índice de atividade pozzolânica (IAP) com cal, índice de desempenho (ID) com cimento, teor de hidróxido de cálcio fixado no Chappelle modificado e caracterização por difratometria de raios X (DRX). Os resultados mostram que o RCV atendeu aos requisitos químico-físicos para pozolanas, IAP com cal, ID com cimento e apresentou singelo halo amorfo na DRX indicando baixa reatividade, porém o material não atendeu requisitos mínimos no ensaio de Chappelle. O pó de concreto, apesar de não ser uma pozolana, foi submetido aos ensaios de IAP com cal e ID com cimento e apresentou resistências à compressão abaixo das mínimas prescritas nas normas pertinentes. Este material também apresentou halo amorfo na DRX, atribuído ao C-S-H da pasta de cimento hidratada.

**Palavras-chave:** adições minerais, resíduo de cerâmica vermelha, resíduo de concreto.

### Abstract

*In this paper, the reactive potential of additions of red ceramic waste (RCW) and concrete of CDW, besides limestone filler for reference, was evaluated. The pozzolanic potential of the additions was evaluated by pozzolanic activity index (PAI) with lime, performance index (PI) with cement, calcium hydroxide content fixed in the modified Chappelle and characterization by X-ray diffraction (XRD). The results indicated that RCW reached the chemical-physical requirements for pozzolans, PAI with lime, PI with cement and presented weak amorphous halo in XRD indicating low reactivity, however, the material did not attain minimum requirements in the Chappelle test. The concrete powder, although it is not a pozzolan, was submitted to PAI with lime and PI with cement tests and presented compressive strengths below the minimums prescribed in the pertinent standards. This material also exhibited amorphous halo in the XRD, attributed to the C-S-H of the paste of hydrated cement.*


**Keywords:** mineral additions, red ceramic waste, concrete waste.

## INTRODUÇÃO

As propriedades mecânicas e a durabilidade de concretos de cimento Portland são definidas por características microestruturais deste compósito. O uso de adições minerais em substituição parcial ao material ligante é uma das alternativas mais utilizadas para modificar a microestrutura do concreto, uma vez que a presença destas adições tende a alterar a estrutura porosa do material. As pozolanas são adições minerais reativas de composição silicosa ou sílico-aluminosa, que reagem com o hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento, dando origem ao C-S-H

secundário [1, 2]. A formação desse composto, somada ao fato da adição ser finamente dividida, ocasionando um refinamento nos poros da matriz hidratada pelo efeito fíler, leva a uma alteração da resistência final e redução na permeabilidade do concreto [2-4]. No Brasil, os requisitos químicos e físicos que os materiais devem atender para que possam ser classificados como pozolana são apresentados pela NBR 12653 [5]. Alguns exemplos tradicionais de materiais pozzolânicos são a sílica ativa, o metacaulim, a cinza de casca de arroz e a cinza volante [2, 6]. Além dos benefícios técnicos no desempenho do concreto, o uso de adições minerais traz vantagens econômicas e ambientais. Os benefícios econômicos se dão pela redução no consumo de energia durante a fabricação do cimento por estar presente em menor quantidade, além do menor consumo

\*fernandabrekailo@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-4095-1682>

de matéria-prima, e os benefícios ambientais se devem em grande parte das adições serem resíduos de outros processos industriais, dando uso assim a um material que seria um passivo ambiental, somado ainda à redução do consumo de recursos naturais, da emissão de CO<sub>2</sub> e do consumo de energia durante a produção do cimento [7, 8].

Estudos com o intuito de encontrar novos materiais que possam ser utilizados como adições minerais já foram e estão sendo realizados. Entre estes materiais estudados, destaca-se o resíduo de cerâmica vermelha. Este resíduo pode ter origem no descarte de peças defeituosas em olarias e também no resíduo de construção e demolição (RCD) [9, 10]. Representando uma outra fração do RCD, o resíduo de concreto também vem sendo estudado na busca de alternativas para sua utilização, tendo em vista a grande quantidade produzida deste material [9, 11]. Para ambos os resíduos, destaca-se a importância de se comprovar a possibilidade de seu uso como adição, tendo em vista a grande quantidade de finos presentes nestes materiais, que de forma geral não são aproveitados. A maioria das pesquisas concentra-se no uso dos resíduos de construção como agregados. Ocorre que mesmo nestes casos uma parcela significativa dos agregados consiste de material pulverulento, sendo esta característica relevante para o desempenho dos concretos e argamassas. A indicação do potencial pozolânico do material pulverulento de determinados agregados reciclados ou ainda a produção de material fino de resíduos de construção e demolição mostram-se promissores [6, 12-18]. Analisando os índices de atividade pozolânica com cal e com cimento para a fração de material cerâmico que compunha o agregado reciclado, Leite [19] verificou que os resultados encontrados sobrepujam os mínimos estipulados pela NBR 12653 [5], e afirma que a pozolanicidade pode ter influenciado nos aumentos de resistência dos concretos analisados. Outros estudos, visando analisar o uso do resíduo de cerâmica vermelha como adição pozolânica em matrizes cimentantes, afirmam ser possível substituir parcialmente o cimento em valores que vão de 20% a 35% [12, 13, 16]. Estes autores

observaram ainda que a adição tem capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio e formar C-S-H, e que é possível incrementar a reatividade e porcentagem de substituição da adição cerâmica aumentando a moagem deste material [6, 14, 16]. Estudos sobre o uso do resíduo de concreto como adição mineral indicam que o material pode ser utilizado como adição em porcentagens que vão de 10% a 25% de substituição, porém a adição apresenta caráter inerte, com comportamento semelhante ao fíler em alguns casos, sendo melhor utilizado quando combinado às adições reativas [15, 17, 18]. Florea et al. [15] observaram ainda que a argamassa constituída com o resíduo de concreto calcinado a 800 °C apresentou ainda um comportamento mecânico semelhante às cinzas volantes. A adição utilizada pelos autores teve o agregado graúdo suprimido.

Neste contexto, a presente pesquisa realizou o estudo de uma alternativa de aproveitamento para o resíduo de blocos de cerâmica vermelha e de concreto cominuído como adição mineral, além do fíler calcário utilizado para parâmetros de referência. Assim é possível aprimorar o conhecimento sobre a reatividade destes materiais *in natura*, além da sua influência nas propriedades de compósitos cimentícios, de forma a verificar a possibilidade do uso de resíduos para elevar a eficiência ambiental do concreto, possibilitando uma finalidade mais nobre para materiais subutilizados.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa foram analisadas três adições minerais: pó de cerâmica vermelha, pó de concreto e fíler calcário, sendo esta última utilizada para referência. O material cerâmico e o resíduo de concreto passaram por um pré-beneficiamento em equipamento de abrasão Los Angeles. A carga utilizada foi de 20 kg, 18 esferas de aço, durante 30 min de beneficiamento a 30 rpm, totalizando 90 revoluções. O resultante foi peneirado e o material final utilizado foi o passante na peneira de abertura de malha de 0,075 mm. O fíler calcário utilizado foi proveniente de uma fábrica de

Tabela I - Caracterização físico-química do cimento Portland CII-F-40.

[Table I - Physico-chemical characterization of Portland cement CII-F-40.]

Ensaio químicos (%)									
Perda ao fogo	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Resíduo insolúvel
4,59	74,73	11,31	3,58	3,25	3,01	2,48	1,36	0,27	0,99
Ensaio físicos									
Massa espec. (g/cm <sup>3</sup> )	Finura (%)		Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Água de consist. (%)	Tempo de pega (min)				
	#200 (75 µm)	#325 (45 µm)			Início	Fim			
3,05	0,00	0,36	4538,18	30,04	221,36	287,05			
Resistência à compressão (MPa)									
Expansibilidade a quente (mm)			1 dia	3 dias	7 dias	28 dias			
0,32			25,28	36,53	41,66	48,06			

cimentos onde foi utilizado como adição mineral. O cimento Portland utilizado foi do tipo CPIIF-40, cujos resultados da caracterização físico-química constam na Tabela I. O agregado miúdo utilizado foi proveniente de leito de rio e teve origem quartzosa. Sua distribuição granulométrica foi composta por 4 frações iguais às da série normal, sendo elas as frações retidas nas peneiras de abertura da malha de 1,20, 0,60, 0,30 e 0,15 mm, conforme recomendações da NBR 7214 [20]. O hidróxido de cálcio P.A. utilizado possuiu massa específica de 2,21 g/cm<sup>3</sup>. O aditivo plastificante utilizado foi o Eucon PL 310, Viapol. É um aditivo de pega normal líquido, de massa específica 1,18 g/cm<sup>3</sup>, cor marrom escuro e não contém cloretos. Segundo recomendação do fabricante, deve ser utilizado nas dosagens de 0,3% a 0,9% em relação à massa do cimento.

A fim de verificar se as adições minerais do estudo atenderam aos requisitos químicos e físicos da NBR 12653 [5] para pozolanas, apesar do resíduo cominuído de concreto e o fíler calcário não serem de fato uma pozolana, realizou-se a caracterização físico-química destas adições por meio dos ensaios de umidade, perda ao fogo, granulometria a laser e espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) por energia dispersiva. A massa específica das adições foi também determinada, pois este dado foi necessário para determinação da quantidade de adição mineral que foi utilizada na dosagem da argamassa no ensaio de IAP com cal, o que justificou as diferentes massas de adição mineral na composição das argamassas apresentadas na Tabela II. O ensaio de umidade foi realizado segundo metodologia da NM 24 [21], o de perda ao fogo de acordo com o primeiro

Tabela II - Proporção de mistura das argamassas para IAP com cal.

[Table II - Mixing proportions of mortars for pozzolanic activity index with lime.]

Argamassa	Adição mineral (g)	Água (g)	Água/aglomerante
Pó de cerâmica vermelha	476,4	478,2	0,70
Pó de concreto	449,8	397,3	0,60
Fíler calcário	508,2	330,7	0,46

Nota: em todas as argamassas foram utilizados 208 g de hidróxido de cálcio e 1872 g de areia normal.

método apresentado pela NM 18 [22] e a determinação da massa específica conforme NM 23 [23]. A distribuição granulométrica foi determinada em granulômetro a laser (Cilas, 920) e o ensaio de FRX realizado em espectrômetro (Shimadzu, EDX 700). Para análise do IAP com cal [24], moldaram-se corpos de prova cilíndricos de 5x10 cm, compostos por hidróxido de cálcio, agregado miúdo, adição mineral e água, para então determinar a resistência à compressão aos 7 dias. A resistência à compressão mínima para a classificação da adição mineral como pozolana é de 6,0 MPa, conforme consta na norma NBR 5751 [24]. A Tabela II apresenta as proporções de mistura das argamassas em massa para determinação do IAP com cal. O teor de água foi variado afim de manter o índice de consistência da argamassa em 225±5 mm pelo ensaio da mesa de espalhamento, de acordo com a NBR 7215 [25].

Realizou-se ainda a análise do ID com cimento [26], por meio da moldagem de corpos de prova de referência (sem adição), compostos apenas por cimento Portland, areia normal e água. Além destes, moldaram-se corpos de prova de argamassa onde 25% da massa do cimento Portland foram substituídos pelas diferentes adições minerais estudadas. Na Tabela III são apresentadas as proporções de mistura das argamassas em massa para determinação do ID com cimento. O aditivo plastificante foi utilizado para manter o índice de consistência da argamassa em 270±10 mm, valor obtido na argamassa de referência pelo ensaio da mesa de espalhamento conforme NBR 7215 [25]. Por se tratar de um aditivo líquido, para manter a relação água/aglomerante constante, a massa de aditivo utilizada foi descontada da massa de água preconizada pela normativa. Os corpos de prova foram rompidos aos 28 dias para determinação de sua resistência à compressão, onde a argamassa com substituição deve apresentar resistência maior que 90% em relação à argamassa de referência para que o material possa ser classificado como adição mineral pozolânica.

A fim de analisar a potencialidade reativa das adições minerais além dos requisitos da normativa NBR 12653 [5], executaram-se também os ensaios de caracterização por difração de raios X (DRX) e Chappelle modificado. O ensaio de DRX foi realizado em um difratômetro (Rigaku, Ultima IV). O passo adotado no ensaio foi de 0,02°, tempo por passo de 1 s e intervalo de varredura entre 5° e 75° (2θ). Utilizou-se a radiação CuKα (40 kV, 30 mA) e uma fenda divergente de 1°. As fases minerais foram identificadas por

Tabela III - Proporção de mistura das argamassas para ID com cimento.

[Table III - Mixing proportions of mortars for determination of performance index with cement.]

Argamassa	Cimento Portland (g)	Adição mineral (g)	Água (g)	Aditivo plastificante (%/massa cimento)
Referência	624	-	300,00	-
Pó de cerâmica vermelha	468	156	295,79	0,9
Pó de concreto	468	156	298,60	0,3
Fíler calcário	468	156	300,00	-

Nota: em todas as argamassas foram utilizados 1872 g de areia normal.

comparação com os padrões do ICDD (International Centre for Diffraction Data). O ensaio de Chappelle modificado foi realizado de acordo com os procedimentos da NBR 15895 [27].

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

*Caracterização das adições minerais:* a Tabela IV apresenta os resultados de massa específica, umidade e perda ao fogo das adições minerais. A composição química dos materiais obtida pelo ensaio de FRX consta na Tabela V. As curvas de distribuição granulométrica das adições minerais utilizadas, além do cimento utilizado na execução das argamassas, estão apresentadas na Fig. 1. A distribuição média de partículas foi maior para o material cerâmico, seguido do resíduo de concreto, fíler calcário e o cimento, o qual se mostrou o mais fino entre os materiais analisados. De acordo com os resultados de caracterização

Tabela IV - Massa específica, umidade e perda ao fogo das adições.

[Table IV - Specific mass, moisture and fire loss of additions.]

Adição mineral	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade (%)	Perda ao fogo (%)
Pó de cerâmica vermelha	2,53	0,1	5,6
Pó de concreto	2,39	0,2	20,0
Fíler calcário	2,70	0,1	43,1

Tabela V - Composição química (% em massa) dos materiais em estudo.

[Table V - Chemical composition (wt%) of the studied materials.]

Adição mineral	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	ZnO	MnO	MgO	Álcalis totais*
Pó de cerâmica vermelha	55,32	0,19	5,27	35,50	1,28	1,23	1,09	0,01	0,04	-	0,84
Pó de concreto	27,41	52,23	8,60	7,35	1,45	1,15	1,33	-	0,48	-	0,95
Fíler calcário	2,97	78,03	0,44	1,73	0,31	1,21	-	-	-	15,06	0,41

\* Álcalis totais= %Na<sub>2</sub>O+0,658.%K<sub>2</sub>O.

Tabela VI - Caracterização das adições e exigências químicas e físicas da NBR 12653 [5] para pozolanas.

[Table VI - Characterization of the additions and chemical and physical requirements of NBR 12653 [5] for pozzolans.]

Determinação (%)	Limites da NBR 12653 [5]			Pó de cerâmica vermelha	Pó de concreto	Fíler calcário
	N	C	E			
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≥ 70	≥ 70	≥ 50	96,09	43,36	5,14
SO <sub>3</sub>	≤ 4	≤ 5	≤ 5	1,23	1,15	1,21
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	0,84	0,95	0,41
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	0,1	0,2	0,1
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	5,6	20,0	43,1
Material retido na peneira 45 μm	< 20	< 20	< 20	28,69	19,76	29,62

Nota: classe N: pozolanas naturais e artificiais, como materiais vulcânicos, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas; classe C: cinza volante proveniente da queima de carvão mineral; classe E: quaisquer pozolanas não contempladas nas classes N e C.

físico-químicas das adições, elaborou-se a Tabela VI, a qual apresenta um comparativo com as exigências químicas e físicas da NBR 12653 [5]. O material cerâmico atendeu aos requisitos químicos especificados pela NBR 12653 [5] quanto ao somatório dos teores SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, onde apresentou resultado superior ao mínimo para todas classes de pozolanas, bem como teor abaixo do máximo para SO<sub>3</sub> e álcalis totais. A adição também atendeu o teor de umidade e a perda ao fogo máxima para materiais pozolânicos. Já o percentual de material retido na peneira 45 μm foi superior ao máximo estabelecido para pozolanas. O pó de concreto não atendeu à somatória mínima dos óxidos para nenhuma

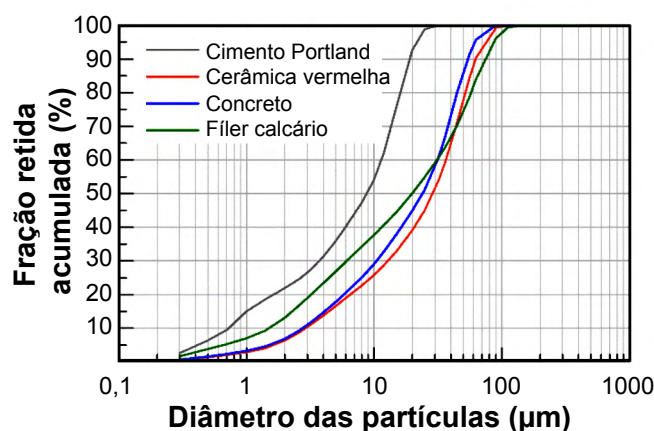


Figura 1: Curvas de distribuição granulométrica do cimento Portland e das adições minerais.

[Figure 1: Particle size distribution curves of Portland cement and mineral additions.]

das classes na NBR 12653 [5], não satisfazendo a premissa de ser um material silicoso ou sílico-aluminoso, como são as pozolanas. Sua composição química atendeu somente ao teor de  $\text{SO}_3$  e álcalis totais. Apesar da baixa umidade, a adição apresentou perda ao fogo superior à permitida para todas classes de material pozolânico. O resíduo de concreto foi a única das adições que atendeu o percentual de material retido na peneira 45  $\mu\text{m}$ . As características químicas deste material indicaram que seu efeito tende a ser somente físico. Já o fíler calcário, apesar de atender à exigência quanto ao teor máximo de  $\text{SO}_3$ , álcalis e umidade, não atendeu ao mínimo exigido no somatório dos teores dos óxidos, o que era esperado tendo em vista que esta é uma adição reconhecidamente inerte. Além disso, o fíler apresentou resultado no ensaio de perda ao fogo muito superior ao permitido para materiais pozolânicos. O percentual de material retido na peneira 45  $\mu\text{m}$  também foi acima do máximo estabelecido para pozolanas.

**Avaliação da atividade pozolânica:** a Fig. 2a apresenta os resultados de resistência à compressão obtidos no ensaio de IAP com cal [24] para as argamassas com as diferentes adições minerais estudadas. Somente o pó de cerâmica vermelha apresentou resultado acima do limite de 6,0 MPa determinado pela NBR 12653 [5], classificando-o por este ensaio como adição mineral pozolânica. Destaca-se que este ensaio não deve ser utilizado para comparar as resistências obtidas pelas diferentes adições, e sim utilizado somente para comparação com o valor normatizado de 6,0 MPa. Isto se deve ao fato da NBR 5751 [24] apresentar um índice de consistência pré-determinado, que deve ser obtido por um volume de água variável, o que interfere na porosidade da argamassa e influencia consequentemente na sua resistência à compressão [28]. Os resultados de resistência à compressão das argamassas obtidos no ensaio de ID com cimento [26] constam na Fig. 2b. De acordo com a NBR 12653 [5], para ser considerada pozolana, a argamassa com 25% de adição deve apresentar 90% da resistência obtida pela argamassa de referência, que correspondeu a 39,4 MPa, limite apresentado na Fig. 2b. De acordo com a análise estatística da resistência obtida pela argamassa com adição de cerâmica vermelha, que atingiu 87,52% da resistência da referência, pode-se afirmar que a mesma atingiu o limite mínimo, também sendo classificada como pozolana por este ensaio. Já a argamassa com adição de resíduo de concreto obteve 77,50% da resistência à compressão em relação à referência, e o fíler calcário 71,59%. Ambas as argamassas, que tiveram resistência à compressão média com valores muito próximos, apresentaram resultados inferiores ao limite mínimo, evidenciando que a utilização destas adições resulta em decréscimo na resistência à compressão. O pó de concreto cominuído de RCD, ao substituir 25% do cimento Portland, reduziu a resistência em aproximadamente 22%. Já o fíler ocasionou redução média de 28%.

Na Fig. 3 estão apresentados os difratogramas de raios X das adições estudadas. O ensaio foi realizado a fim de determinar se as adições apresentaram halo amorfo em seus difratogramas, que é característico em pozolanas, tendo

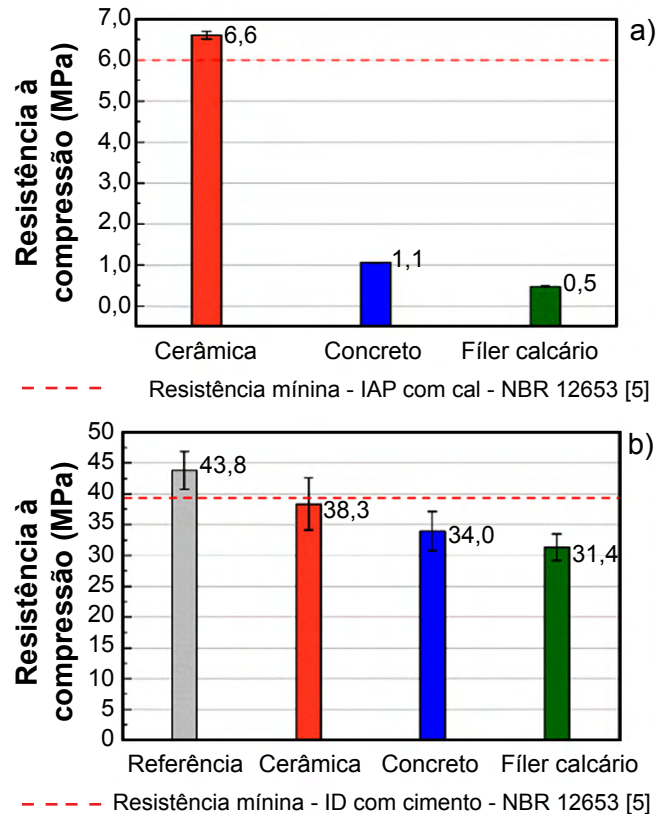


Figura 2: Resistência à compressão obtida nos ensaios de IAP com cal (a) e ID com cimento (b), e limites impostos pela NBR 12653 [5]. [Figure 2: Compressive strength obtained in the pozzolanic activity index with lime (a) and performance index (b) tests, and limits imposed by NBR 12653 [5].]

em vista que a reatividade da adição está relacionada à quantidade de material que se encontra no estado amorfo [6]. No material cerâmico foi possível identificar um singelo halo amorfo característico de fração vítrea entre  $15^\circ$  e  $40^\circ$ , o que ocorreu entre  $20^\circ$  e  $40^\circ$  para o resíduo de concreto. No caso da cerâmica, este resultado indicou que o material apresentou uma baixa reatividade com a composição do cimento Portland, resultado também observado em [29]. O halo amorfo identificado no resíduo de concreto pode ser atribuído ao C-S-H da pasta de cimento hidratada, tendo em vista que este composto corresponde a uma formação amorfa. Por outro lado, o fíler calcário não apresentou halo amorfo, confirmando o caráter inerte desta adição mineral.

No difratograma do pó de cerâmica vermelha (Fig. 3a) foram encontrados picos predominantemente referentes ao quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), com pequenas quantidades de caulinita [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ], muscovita [ $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ ] e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). As fases cristalinas identificadas justificaram a perda ao fogo apresentada pela cerâmica, tendo em vista que a desidroxilação da caulinita ocorre entre 500 e 600  $^\circ\text{C}$ , enquanto a muscovita se decompõe em torno de 800  $^\circ\text{C}$ , temperaturas estas inferiores à da realização do ensaio de perda ao fogo, que foi de 950  $^\circ\text{C}$  [30, 31]. Apesar dos blocos e tijolos cerâmicos serem sinterizados em temperaturas similares a do ensaio, a adição utilizada

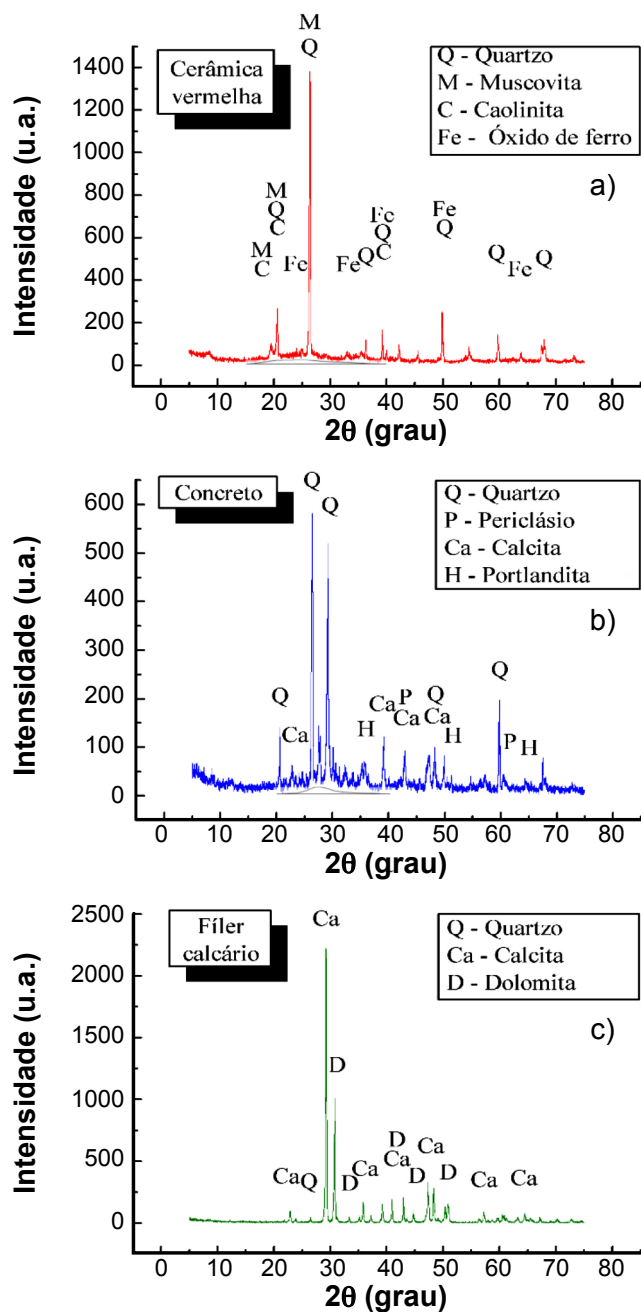


Figura 3: Difratoformas de raios X das adições minerais.  
[Figure 3: X-ray diffraction patterns of mineral additions.]

nesta pesquisa foi oriunda dos resíduos destes materiais, que podem não ter tido a adequada sinterização, motivando o descarte. Ao serem submetidos a 950 °C durante o ensaio, a muscovita foi decomposta e a caulinita desidroxilou, fazendo com que o material apresentasse uma pequena porcentagem de perda ao fogo. Winkler e Müller [32] afirmam que as propriedades pozolânicas apresentadas pela adição cerâmica se devem à presença de uma forma de metacaulim instável e altamente reativo, que interage com a portlandita formada na hidratação do cimento, dando origem ao C-S-H secundário. O metacaulim é uma conhecida adição pozolânica de estrutura amorfa, obtido pela calcinação de argila caulínica [33]. Os compostos identificados na DRX

do material cerâmico são, excetuando-se o óxido de cálcio, os mesmos das pesquisas [29, 34], que deu origem à adição pelo óxido [34]. A presença desta forma de metacaulim citada em [32] explicaria o comportamento desta adição nos outros ensaios de análise de reatividade pozolânica, pois o material teve interação com as argamassas e atingiu as resistências exigidas pela NBR 12653 [5]. A diferença entre os difratogramas do metacaulim de outros trabalhos e da cerâmica vermelha desta pesquisa foi no halo amorfo, indicando que o material analisado foi de menor reatividade que o metacaulim utilizado como adição mineral. O difratograma do pó de concreto (Fig. 3b) apresentou picos predominantes de quartzo, calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), portlandita [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] e periclásio ( $\text{MgO}$ ). As fases cristalinas identificadas também justificaram o resultado de perda ao fogo do material, tendo em vista que a calcita é estável até 600 °C e se decompõe a partir de 700 °C, enquanto a portlandita desidrata até 100 °C e decompõe-se entre 500 e 550 °C. Estas temperaturas são inferiores à da realização do ensaio de perda ao fogo. Sendo assim, ambas as fases foram decompostas [35-37]. Na amostra de filer calcário (Fig. 3c), o difratograma apresentou picos de calcita, dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) e quartzo. Sua composição também foi de acordo com o resultado de perda ao fogo, pois a dolomita, assim como a calcita, decompõe-se em temperaturas menores que as atingidas no ensaio [35, 37].

O ensaio de Chapelle modificado não foi realizado para as adições de pó de concreto e filer calcário tendo em vista que ambas já possuíam cálcio em sua composição. O pó de concreto possui calcita e portlandita e o filer calcário apresentou em sua composição calcita e dolomita. Como o ensaio consistiu em uma mistura de óxido de cálcio com a adição de água para determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado, a composição destes materiais inviabilizou a quantificação da cal remanescente. O consumo mínimo atribuído a materiais pozolânicos é de 330 mg  $\text{CaO/g}$  pozolana, o que corresponde por estequiometria a 436 mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$  pozolana [38]. O resíduo de cerâmica vermelha apresentou o teor de 395 mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$  amostra, resultado abaixo do mínimo, não podendo então ser classificado como pozolana. Para o filer quartzoso, uma adição inerte, o valor encontrado na literatura é de 140 mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$  adição [28]. Para cinza volante, uma pozolana de baixa reatividade, os valores vão de 369 a 482 mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$  pozolana; já a sílica ativa, que constitui uma adição de alta reatividade, o teor varia de 1044 a 1336 mg  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$  pozolana [29, 39, 40]. Garcia et al. [10] e Gobbi [6] conseguiram teores de hidróxido de cálcio fixado superiores ao do presente estudo para o material cerâmico com o uso de moagem e, no caso da segunda pesquisa, associado ainda à calcinação. No presente estudo optou-se por não fazer a moagem e a calcinação do material pela demanda energética que estes processos demandam, fugindo das questões ambientais relacionadas à redução do impacto gerado por este passivo ambiental. Outro aspecto relevante é que, durante o uso de agregados reciclados, a fração pulverulenta é adicionada às misturas cimentícias na forma *in natura*, sendo então relevante esta

análise sem manipulação do material cerâmico. Ressalta-se ainda que, para resíduos provenientes de RCD, esta fração deve ser produzida no próprio processo de beneficiamento do RCD, estando o material na finura inerente ao processo. Caso o material fosse manipulado para uso exclusivo como adição mineral seria possível associar seu beneficiamento a outro processo industrial de forma a melhorar suas propriedades como finura e cristalinidade.

*Considerações finais:* analisando primeiramente a adição de pó de cerâmica vermelha, identificou-se que, apesar de neste estudo o resultado ser positivo em relação aos parâmetros exigidos pela NBR 12653 [5] para pozolanas, os valores encontrados tanto para estes ensaios quanto no de Chapelle modificado e DRX, que não são exigências da normativa, quando comparados a outras pesquisas, não se observou um padrão no comportamento. Isso pode ter ocorrido devido a variações na composição da massa cerâmica e dos ciclos e temperaturas de queima adotados no processo produtivo. Além disso, variações na preparação do material levam a diferenças na finura, distribuição granulométrica, demanda de água para as argamassas e distribuição de poros das argamassas, por exemplo. Mesmo frente a esta grande variabilidade, o material apresentou potencial para ser utilizado, porém com baixa reatividade na forma *in natura*. Destaca-se como alternativa o estudo de métodos de beneficiamento que levem a um aumento na reatividade do material cerâmico, de forma que o material apresente maior área de superfície para potencializar a interação com a portlandita e formar C-S-H secundário [32]. Por meio desses processos, algumas pesquisas já indicam melhora no comportamento da adição cerâmica [6, 14, 16]. Já o pó de concreto, além de não apresentar halo amorfo indicando reatividade, não atendeu a todos parâmetros da NBR 12653 [5]. Oksri-Nelfia et al. [18] encontraram comportamento semelhante para esta adição e o fíler calcário. Neste estudo, o resíduo de concreto apresentou resultados superiores aos do fíler nos ensaios de avaliação da pozolanicidade. Ressalta-se que o concreto utilizado como adição nas pesquisas possui composições, idades e condições de exposições variadas. Na prática, isso também ocorre.

Tendo em vista a variabilidade dos materiais estudados, recomenda-se análise do resíduo que será efetivamente utilizado, verificando sua atividade pozolânica ou possibilidade de uso como material de enchimento, para assim determinar a porcentagem ideal de substituição de forma a não comprometer o desempenho da estrutura. A NBR 12653 [5] exige uma quantidade mínima de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ . Porém, a normativa não exige ensaios que avaliem se a sílica é amorfa ou não. Desta forma, ressalta-se a importância de realizar ensaios que avaliem o estado cristalino da sílica, realizado nesta pesquisa pelo ensaio de DRX. Entende-se que a presença destas adições é inevitável em matrizes cimentícias de compósitos que contenham resíduos de construção e demolição, tendo em vista que tanto a cerâmica vermelha como o concreto representam duas das três maiores parcelas do RCD. Assim,

mais estudos devem ser desenvolvidos buscando entender as variáveis que podem potencializar seu uso. Destaca-se como uma alternativa o estudo de adições combinadas buscando-se potencializar suas propriedades e investigando as mudanças microestruturais associadas às propriedades mecânicas de concretos e argamassas.

## CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal a avaliação do potencial reativo de adições de pó de cerâmica vermelha e pó de concreto, utilizando também fíler calcário como adição para comparações. Sendo assim, seguem as conclusões com base nas análises dos ensaios realizados. O pó de cerâmica vermelha, apesar de não atingir o valor mínimo de fixação de hidróxido de cálcio no ensaio de Chapelle modificado, atendeu aos requisitos apresentados pela NBR 12653 para pozolanas, no que se refere à composição química, umidade, perda ao fogo, índice de atividade pozolânica (IAP) com cal e índice de desempenho (ID) com cimento. Além disso, apresentou singelo halo amorfo na difração de raios X (DRX), indicando ser um material de baixa reatividade. O resíduo de concreto atendeu somente os parâmetros de umidade, teor de óxido de enxofre e de álcalis disponíveis determinados pela NBR 12653. A adição apresentou perda ao fogo acima do limite máximo, teores de óxido de sílica, óxido de alumínio e óxido de ferro abaixo do limite mínimo e ainda resistências inferiores às mínimas nos ensaios de IAP com cal e ID com cimento. O pó de concreto apresentou halo amorfo na DRX devido à presença do C-S-H da pasta de cimento hidratada. O fíler calcário atendeu somente aos mesmos parâmetros que o pó de concreto, porém com desempenho inferior em todos ensaios de avaliação de pozolanicidade, com exceção da umidade, que apresentou valor pouco menor que do resíduo de concreto. A adição não apresentou halo amorfo na DRX, indicando que não houve reatividade no material, confirmando seu caráter inerte. Os resultados obtidos indicaram que o resíduo de cerâmica vermelha apresenta potencial pozolânico e confirmaram o caráter inerte do pó de concreto e o fíler calcário.

## REFERÊNCIAS

- [1] V.M. Malhotra, P.K. Mehta, *Pozzolanic and cementitious materials*, Gordon Breach, Amsterdam (1996).
- [2] D.C.C. Dal Molin, in “Concreto: ciência e tecnologia”, G.C. Isaia (Org.), Ibracon, S. Paulo (2011).
- [3] P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*, 3ª ed., Ibracon, S. Paulo (2008).
- [4] H. Siad, H.A. Mesbah, M. Mouli, G. Escadeillas, H. Khelaf, Arab. J. Sci. Eng. **39** (2014) 3641.
- [5] NBR 12653, “Materiais pozolânicos”, Ass. Bras. Norm. Téc., Rio Janeiro (2014).
- [6] A. Gobbi, “Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares”, Diss. Mestr., Un. Fed. Paraná, Curitiba (2014).

- [7] Int. Energy Ag., “Technology roadmap: cement” (2009) <http://www.iea.org, ac. 01/2017>.
- [8] M.H.F. Medeiros, D.J. Souza, J. Hoppe Filho, C.S. Adorno, V.A. Quarcioni, E. Pereira, *Matéria* **21**, 2 (2016) 282.
- [9] A.E.B. Cabral, V. Schalch, D.C.C. Dal Molin, J.L.D. Ribeiro, *Constr. Build. Mater.* **24** (2010) 421.
- [10] E. Garcia, M. Cabral Junior, V.A. Quarcioni, F.F. Chotoli, *Cerâmica* **61**, 358 (2015) 251.
- [11] CONAMA 307/2002, “Área de manejo de resíduos da construção e resíduos volumosos: orientação para o seu licenciamento e aplicação da resolução”, Min. Cidades, Min. Meio Amb., Brasília (2005).
- [12] N. Ay, M. Ünal, *Cement Concrete Res.* **30** (2000) 497.
- [13] A.E. Lavat, M.A. Trezza, M. Poggi, *Waste Manage.* **29** (2009) 1666.
- [14] L.A. Pereira-de-Oliveira, J.P. Castro-Gomes, P.M.S. Santos, *Constr. Build. Mater.* **31** (2012) 197.
- [15] M.V.A. Florea, Z. Ning, H.J.H. Brouwers, *Constr. Build. Mater.* **50** (2014) 1.
- [16] G. Cassol, “Caracterização e utilização do resíduo de cerâmica vermelha como material pozolânico em matrizes cimentantes”, Diss. Mestr., Un. Estad. Paul. ‘Júlio Mesquita Filho’, Ilha Solteira (2015).
- [17] M. Barthel, K. Rübner, H.C. Kühne, A. Rogge, F. Dehn, *Adv. Cem. Res.* **28**, 7 (2016) 458.
- [18] L. Oksri-Nelfia, P.Y. Mahieux, O. Amiri, P. Turcry, J. Lux, *Mater. Struct.* **49**, 8 (2016) 3239.
- [19] M.B. Leite, “Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição”, Diss. Mestr., Un. Fed. Rio Grande Sul, Porto Alegre (2001).
- [20] NBR 7214, “Areia normal para ensaio de cimento”, Ass. Bras. Norm. Téc., Rio Janeiro (2012).
- [21] NBR NM 24, “Materiais pozolânicos - determinação do teor de umidade”, Ass. Bras. Norm. Téc., Rio Janeiro (2002).
- [22] NBR NM 18, “Cimento Portland - análise química - determinação de perda ao fogo”, Ass. Bras. Norm. Téc., Rio Janeiro (2004).
- [23] NBR NM 23, “Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica”, Ass. Bras. Norm. Téc., Rio Janeiro (2001).
- [24] NBR 5751, “Materiais pozolânicos - determinação da atividade pozolânica - índice de atividade pozolânica com cal - método de ensaio”, Ass. Bras. Norm. Téc., Rio Janeiro (2012).
- [25] NBR 7215, “Cimento Portland - determinação da resistência à compressão”, Ass. Bras. Norm. Téc., Rio Janeiro (1996).
- [26] NBR 5752, “Materiais pozolânicos - determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias”, Ass. Bras. Norm. Téc., Rio Janeiro (2014).
- [27] NBR 15895, “Materiais pozolânicos - determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - método Chapelle modificado”, Ass. Bras. Norm. Téc., Rio Janeiro (2010).
- [28] J. Hoppe Filho, A. Gobbi, E. Pereira, V.A. Quarcioni, M.H.F. Medeiros, *Rev. Matér.* **22**, 3 (2017) e11873.
- [29] J. Hoppe Filho, D.J. Souza, M.H.F. Medeiros, E. Pereira, K.F. Portela, *Cerâmica* **61**, 358 (2015) 168.
- [30] M.M. Ferreira, A.F.D.C. Varajão, A.M. Morales-Carrera, M.G. Peralta-Sánchez, G.M. Costa, *Cerâmica* **58**, 345 (2012) 105.
- [31] W.P. Gonçalves, V.J. Silva, J. Gomes, R.R. Menezes, G.A. Neves, H.C. Ferreira, L.N.L. Santana, *Cerâmica* **60**, 355 (2014) 316.
- [32] A. Winkler, H.A. Müller, in “Sustainable construction: use of recycled concrete aggregate”, Thomas Telford Pub., Londres (1998) 157.
- [33] J.T. Ding, Z. Li, *ACI Mater. J.* **99** (2002) 393.
- [34] E.A. Medina, “Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio”, Diss. Mestr., Un. S. Paulo, S. Paulo (2011).
- [35] M.F. Canovas, *Patologia y terapeutica del hermigón armado*, Ed. Dossat, Madrid (1977).
- [36] R.C.A. Lima, L.D. Kirchhof, C.A. Casonato, L.C.P. Silva Filho, in II Sem. Patolog. Edif. - Novos Mater. Tecn. Emerg., Un. Fed. Rio Grande Sul, Porto Alegre (2004).
- [37] I. Hager, *Bull. Pol. Ac. Tech.* **61**, 1 (2013) 1.
- [38] M. Raverdy, F. Brivot, A.M. Paillere, R. Dron, in 7<sup>th</sup> Int. Congr. Chem. Cem., Paris (1980).
- [39] G.P. Gava, L.R. Prudêncio Júnior, *Mag. Concrete Res.* **59**, 10 (2007) 729.
- [40] J. Hoppe Filho, “Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto”, Tese Dr., Un. S. Paulo, S. Paulo (2008).

(Rec. 23/07/2018, Rev. 20/12/2018, Ac. 06/02/2019)