

AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE DE POZOLANA OBTIDA A PARTIR DE RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA

A. L. Castro, E. Garcia, R. F. C. Santos, V. A. Quarcioni, A. C. Camargo
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Centro de Tecnologia de
Obras de Infraestrutura, Laboratório de Materiais de Construção Civil
Av. Prof. Almeida Prado, 532, Prédio 59, Térreo, Butantã, São Paulo/SP – CEP: 05508-901
– e-mail: alcastro@ipt.br

Resumo

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 e gera grande quantidade de resíduos sólidos e gases poluentes, não só na fase de extração das matérias-primas, como também na fabricação, transporte, uso, manutenção e descarte. A incorporação de adições minerais na produção de cimento e/ou de concreto com o objetivo de melhorar o desempenho e a durabilidade desses materiais tem aumentado bastante nos últimos anos, e fatores econômicos e ambientais têm um papel importante nesse crescimento, uma vez que essas adições geralmente são resíduos ou subprodutos industriais. De uma maneira geral, as adições minerais são materiais silicosos finamente divididos, normalmente adicionados ao cimento e ao concreto em quantidades relativamente grandes, que interagem química e fisicamente com os produtos da hidratação do cimento, modificando sua microestrutura. Neste contexto, a utilização de resíduos de cerâmica vermelha se torna uma alternativa possível para aplicação deste material como adição mineral para cimento e concreto, uma vez que ele é composto principalmente por argilominerais. Porém, para que este resíduo reaja quimicamente com os produtos da hidratação do cimento, ele deve atender requisitos químicos e físicos especificados nas normas correspondentes. No presente trabalho, o resíduo de cerâmica vermelha, adquirido em cacos, foi moído em laboratório para a produção da pozolana, potencial produto a ser utilizado como adição mineral na produção de cimento e concreto. A fim de avaliar seu potencial de reatividade com os produtos de hidratação do cimento, foi realizado o ensaio para determinação do índice de atividade pozolânica com cal por meio de ensaios mecânicos. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que os materiais avaliados podem ser considerados como material pozolânico e, assim, serem utilizados como adição mineral para a produção de cimento e concreto.

Palavras-chave: resíduo; cerâmica vermelha; pozolana; cimento; concreto.

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 e gera grande quantidade de resíduos sólidos e gases poluentes, não só na fase de extração das matérias-primas, como também na fabricação, no transporte, no uso, na manutenção e no descarte.

Neste contexto, a incorporação de adições minerais na produção de cimentos ou concretos com o objetivo de melhorar o desempenho e a durabilidade desses materiais tem aumentado bastante nos últimos anos, e fatores econômicos e ambientais têm um papel importante nesse crescimento. As adições minerais fornecem um conforto ambiental, pois subprodutos industriais são reciclados, emissões perigosas lançadas na atmosfera durante a produção do cimento são reduzidas, matérias-primas são preservadas e energia é economizada⁽¹⁾. Assim, existe um duplo benefício ambiental através da utilização das adições minerais.

Adições minerais

De uma maneira geral, as adições minerais são materiais silicosos finamente divididos, normalmente adicionados ao cimento e ao concreto em quantidades relativamente grandes, que variam de 20% a 70% em relação à massa do material cimentício total⁽²⁾, interagindo química e fisicamente com os produtos da hidratação do cimento e, assim, modificando a microestrutura do material. O efeito químico está associado à capacidade de reação da adição mineral com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), formado durante a hidratação do cimento, para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. A reação entre a adição mineral e o Ca(OH)_2 é denominada reação pozolânica, que pode ser lenta ou rápida dependendo da superfície específica das partículas e da composição química da adição mineral.

Do ponto de vista físico, os efeitos principais que podem ser gerados pelas adições minerais nos materiais à base de cimento são: efeito microfíler, resultante do aumento da densidade da mistura pelo preenchimento de espaços vazios pelas partículas das adições, cujo diâmetro médio deve ser semelhante ou menor que o diâmetro médio das partículas de cimento; refinamento da estrutura de poros, causado pelas pequenas partículas das adições que podem agir como pontos de

nucleação para os produtos de hidratação; e alteração da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que fica retido sob os agregados, bem como preenchendo os espaços vazios deixados pelas partículas de cimento próximas à superfície do agregado (efeito microfíler) e reduzindo a concentração de Ca(OH)_2 na região devido à reação pozolânica⁽³⁾. Assim, de acordo com sua ação físico-mecânica, as adições minerais podem ser classificadas em:

- material pozolânico: material silicoso ou silicoaluminoso que, por si só, possui pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente dividido e na presença de água, reage com o Ca(OH)_2 à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes⁽⁴⁾. São utilizadas como materiais pozolânicos as pozolanas naturais de origens vulcânica ou sedimentar, as pozolanas artificiais resultantes de processos industriais ou provenientes de tratamento térmico, as argilas calcinadas em temperaturas entre 500°C e 900°C, as cinzas volantes resultantes da combustão de carvão pulverizado ou granulado, bem como outros materiais não tradicionais, tais como escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de materiais vegetais e rejeito de carvão mineral;
- material cimentante: não necessita do Ca(OH)_2 presente no cimento hidratado para formar produtos aglomerantes como o C-S-H. Porém, sua auto-hidratação é normalmente lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para sua aplicação como material para fins estruturais. Quando usado como adição ou substituição ao cimento, a presença de Ca(OH)_2 e de gipsita acelera sua hidratação. O exemplo clássico de material cimentante é a escória de alto-forno, um resíduo não metálico proveniente da produção do ferro-gusa, e;
- fíler: adição mineral finamente dividida sem atividade química, ou seja, sua ação se resume ao efeito físico de empacotamento de partículas (efeito microfíler) e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento (efeito de refinamento de poros). São adicionados em quantidades de até 10% para a produção de cimentos compostos, e em quantidades de até 15% em relação à massa de cimento para a produção de concreto. Entre os materiais mais utilizados como fíler, desde que devidamente moídos (diâmetro

médio próximo ao do cimento), estão o pó de quartzo, o pó de granito e o pó de pedra.

Dentre os principais benefícios obtidos com o uso de adições minerais no cimento e no concreto incluem-se melhor resistência à fissuração térmica devido ao baixo calor de hidratação, aumento da resistência final e impermeabilidade devido ao refinamento dos poros, fortalecimento da zona de transição na interface entre a pasta de cimento e os agregados, e maior durabilidade no que diz respeito ao ataque por sulfato e à expansão pela reação álcali-agregado⁽²⁾.

Resíduo de cerâmica vermelha

O segmento de cerâmica vermelha brasileiro integra o ramo de produtos de minerais não metálicos da Indústria de Transformação, fazendo parte do conjunto de cadeias produtivas que compõem o Complexo da Construção Civil. A indústria de cerâmica vermelha no país é um segmento do setor cerâmico com uma estrutura empresarial bastante assimétrica, pulverizada e de capital estritamente nacional, que tem como atividade a produção de uma grande variedade de materiais, como blocos de vedação e estruturais, telhas, tijolos maciços, lajotas e tubos, além de outros produtos para fins diversos.

Atualmente, pode-se afirmar que a indústria de cerâmica vermelha do Brasil está passando por um período de franca expansão, motivada pelo crescimento da economia do país e políticas públicas de fomento ao setor habitacional. Apesar dos esforços e recentes avanços da indústria cerâmica nacional, envolvendo uma série de iniciativas importantes, como melhoria dos processos industriais, maior controle e padronização dos produtos, e a sua capacitação técnica e gerencial, um entrave importante que persiste em praticamente todos os arranjos produtivos locais (APLs) de base mineral 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 acontece com as peças defeituosas após a queima que, por não ter até o momento nenhum aproveitamento em larga escala, vem sendo descartado junto aos empreendimentos cerâmicos. Além das perdas econômicas, esse processo cumulativo de resíduos tem resultado em passivos ambientais de dimensões consideráveis nas aglomerações cerâmicas. Com base em informações obtidas

junto às diversas aglomerações produtivas, estima-se que as perdas em produtos cerâmicos acabados situam-se na faixa de 5% a 10%, representando um descarte de cacos cerâmicos de cerca de 1,5 a 3,0 milhões toneladas por ano no território paulista.

Com o intuito de reduzir os passivos ambientais gerados pelas indústrias de cerâmica vermelha, diminuir os custos operacionais e agregar valores aos produtos dessas empresas, tem sido desenvolvido pesquisas contemplando o aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como adição mineral para produção de cimento e concreto. Esta aplicação foi cogitada em função da composição química do material ser compatível com a composição química de outros materiais utilizados para a mesma finalidade.

O setor de cerâmica vermelha utiliza a chamada massa monocomponente, composta basicamente só por argilas, isto é, não envolve a mistura de outras substâncias minerais (caulim, filito, rochas feldspáticas, talco e rochas calcárias), como em outros segmentos da indústria cerâmica. A formulação da massa é feita geralmente de forma empírica pelo ceramista, envolvendo a mistura de uma argila “gorda”, caracterizada pela alta plasticidade e granulometria fina, com uma argila “magra”, rica em quartzo e menos plástica, que pode ser caracterizada como um material redutor de plasticidade e que permite a drenagem adequada das peças nos processos de secagem e queima. Após a queima, a maioria dos produtos de cerâmica vermelha é composta basicamente por argilominerais, com presença de pouca fase vítrea decorrente da baixa temperatura de queima (800°C a 950°C).

MATERIAIS E MÉTODOS

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: inicialmente até totalmente passante na peneira de abertura de 0,85 mm (20 Mesh); e depois até totalmente passante na peneira de abertura de 0,075 mm (200 Mesh).

A primeira fase da britagem dos cacos cerâmicos, ou seja, para obtenção de material até totalmente passante na peneira de abertura de 0,85 mm (20 Mesh), foi subdivida em duas etapas. Na primeira etapa 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 diâmetro. Em seguida, o material foi colocado em estufa a 100°C por 24 horas para secagem até obtenção de massa constante. Na sequência, foi realizada a segunda etapa da britagem em que o material pré-moído e seco foi britado por meio de outro britador de mandíbula com abertura menor, retornando o material não passante ao britador até a britagem não ser mais possível devido ao material ter atingido tamanho suficiente para passar pelo vão da mandíbula. O material que restou não passante na peneira de abertura de 0,85 mm (20 Mesh), cerca de 1 kg de material, foi moído em moinho de disco.

O material obtido foi quarteado e colocado em tambor para homogeneização por rolagem, que aconteceu por uma extensão de aproximadamente 40 m. Terminada a homogeneização, o material totalmente passante na peneira de abertura de 0,85 mm (20 Mesh), armazenado em tambores, foi novamente quarteado para obtenção da amostra destinada à produção de pozolana. O processo adotado na primeira fase da britagem dos cacos cerâmicos é ilustrado na Figura 1.



Figura 1 – Primeira fase da britagem dos cacos cerâmicos – Material até totalmente passante na peneira de abertura de 0,85 mm (20 Mesh): (a) alimentação do britador de mandíbula utilizado; (b) material coletado durante a britagem; e (c) material resultante da primeira etapa de britagem. Material até totalmente passante na peneira de abertura de 0,075 mm (200 Mesh): (d) peneiramento do material obtido após sucessivas britagens; (e) rolagem do tambor de armazenamento para homogeneização do material britado; e (f) quarteamento do material produzido para coleta de amostra destinada à produção da pozolana.

A segunda fase da britagem dos cacos cerâmicos, ou seja, para obtenção de material até totalmente passante na peneira de abertura de 0,075 mm (200 Mesh), foi realizada utilizando a amostra de 10 kg de material separada por quarteamento

após a primeira fase da britagem, descrita anteriormente. Esta fase da britagem, destinada à produção da pozolana, foi realizada utilizando-se um moinho de bolas. Para evitar a aglomeração das partículas do material, em função do seu pequeno diâmetro, foi utilizado um aditivo de moagem de cimento que atua nas cargas de superfície das partículas (aditivo MDTA 300 fornecido pela GRACE), aumentando o rendimento do processo de moagem, melhorando a qualidade do cimento e reduzindo os custos de fabricação.

O processo de moagem foi realizado ininterruptamente durante 2 horas e, ao término desse período, foram retiradas alíquotas de aproximadamente 130 g para peneiramento em peneira com abertura de 0,075 mm (200 Mesh), realizado a seco com o auxílio de uma trincha. Quando o fundo não mais apresentava material passante pela peneira, fez-se a pesagem do material retido e determinou-se a percentagem de material retido em relação à massa da alíquota coletada. Quando a porcentagem retida calculada foi superior a 3%, realizou-se uma nova moagem por mais 30 minutos. Terminado o tempo complementar de moagem, retirou-se nova alíquota de material e verificou-se a quantidade de material retido, sendo o processo repetido até que o material moído fosse totalmente passante na peneira com abertura de 0,075 mm (200 Mesh). O material obtido ao final deste processo de peneiramento foi avaliado como possível material a ser utilizado como adição mineral para a produção de cimento e concreto.

Todo o processo adotado na segunda fase da britagem para obtenção de material até totalmente passante na peneira de abertura de 0,075 mm (200 Mesh) é ilustrado na Figura 2.

Avaliação do índice de atividade pozolânica

No caso de materiais pozolânicos a serem usados como adição mineral para produção de cimento e concreto, para que o material reaja quimicamente com os produtos da hidratação do cimento, a NBR 12653:2012⁽⁴⁾ estabelece os requisitos químicos e físicos apresentados na Tabela 1.

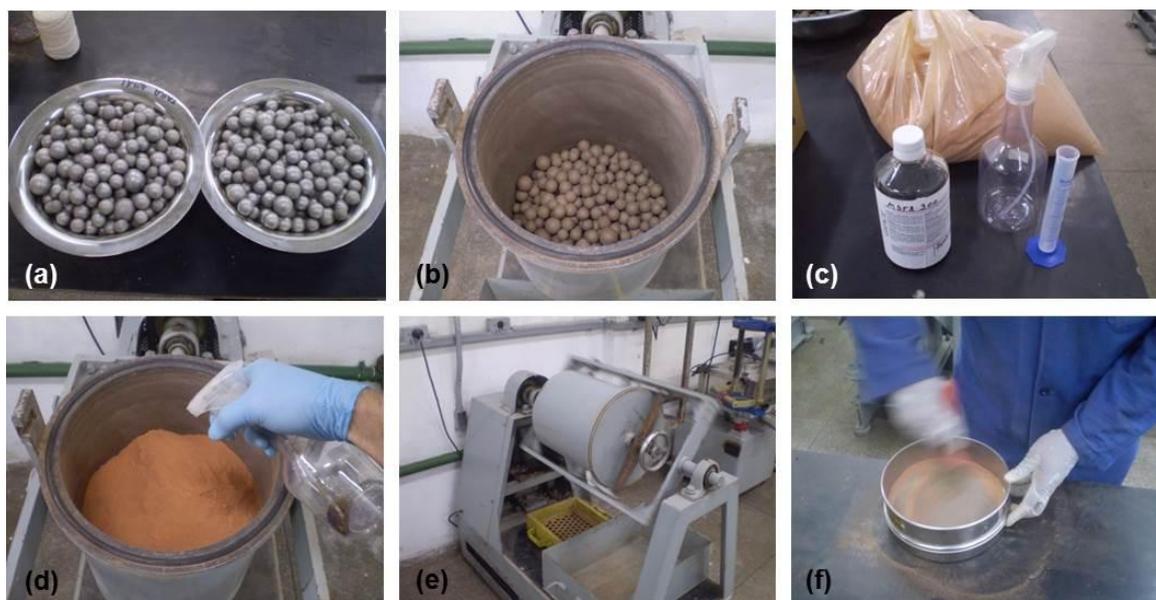


Figura 2 – Segunda parte da britagem dos cacos cerâmicos – Material até totalmente passante na peneira de abertura de 0,075 mm (200 Mesh): (a) esferas moedoras utilizadas na moagem; (b) vaso de moagem; (c) aditivo de moagem utilizado; (d) aspersão do aditivo de moagem sobre o material cerâmico; (e) moagem do material cerâmico em moinho de bolas durante 2 horas; e (f) peneiramento do material moído para atendimento à especificação de ser totalmente passante na peneira com abertura de 0,075 mm (200 Mesh).

Tabela 1 – Requisitos químicos e físicos para materiais pozolânicos, conforme especificado na NBR 12653:2012⁽⁴⁾.

Requisitos	Propriedades	Classe de material pozolânico		
		N	C	E
Químicos	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\geq 70\%$	$\geq 70\%$	$\geq 50\%$
	SO_3	$\leq 4\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$
	Teor de umidade	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$
	Perda ao fogo	$\leq 10\%$	$\leq 6\%$	$\leq 6\%$
	Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$
Físicos	Material retido na peneira com abertura de malha de 45 μm	$\leq 34\%$	$\leq 34\%$	$\leq 34\%$
	Índice de atividade pozolânica: Com cimento aos 28 dias, em relação ao controle	$\geq 75\%$	$\geq 75\%$	$\geq 75\%$
	Com a cal aos 7 dias	$\geq 6 \text{ MPa}$	$\geq 6 \text{ MPa}$	$\geq 6 \text{ MPa}$
	Água requerida	$\leq 115\%$	$\leq 110\%$	$\leq 115\%$

Classe N: contempla as pozolanas naturais e artificiais, bem como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido (teor de SiO_2 de 65%), cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas;

Classe C: contempla a cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termelétricas;

Classe E: contempla qualquer pozolana cujos requisitos difiram das classes anteriores.

No caso do índice de atividade pozolânica, a reatividade da pozolana obtida a partir do resíduo de cerâmica vermelha foi avaliada por meio da determinação do índice de atividade com cal, devido à reação pozolânica que ocorre entre o material pozolânico e o Ca(OH)_2 resultante da hidratação do cimento Portland, sendo o ensaio realizado de acordo com a NBR 5751:2012⁽⁵⁾. Para isso, foi produzida uma argamassa composta por hidróxido de sódio, areia e pozolana, em proporções definidas pela norma, sendo a quantidade de água para a mistura aquela correspondente a um índice de consistência de (225 ± 5) mm obtido no ensaio de abatimento, conforme prescrito na NBR 7215:1996⁽⁶⁾.

Após a definição da composição da argamassa, foram moldados corpos de prova cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, mantidos e curados nos próprios moldes durante 7 dias. Nesta idade, após a desmoldagem, os corpos de prova foram ensaiados para determinação da resistência à compressão (Figura 3), sendo ensaiados três corpos de prova para cada pozolana produzida em laboratório.

De acordo com a NBR 12653:2012⁽⁴⁾, para ser caracterizada como um material pozolânico a pozolana deve apresentar índice de atividade pozolânica com a cal, aos 7 dias de idade, superior a 6 MPa medido a partir do ensaio de resistência à compressão.



Figura 3 – Ruptura de corpo de prova para determinação de índice de atividade pozolânica com a cal.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a realização do estudo, foram coletados resíduos de cerâmica vermelha em empresas ceramistas constituintes dos APLs das cidades de Itu e Tambaú, localizadas no estado de São Paulo. As amostras de pozolanas, produzidas a partir da moagem de resíduos de cerâmica vermelha (cacos), resultantes da produção de blocos de vedação e telhas cerâmicas, foram identificadas separadamente em função da cerâmica de origem do resíduo conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Identificação das amostras de pozolana obtida a partir de resíduos de cerâmica vermelha.

Identificação da amostra	Cerâmica de Origem	APL	Produto cerâmico de origem
LMCC 1363/13	A	Itu	Bloco de vedação
LMCC 1364/13	B	Itu	Bloco estrutural
LMCC 1365/13	C	Tambaú	Telha
LMCC 1366/13	D	Tambaú	Telha

A reatividade da pozolana obtida a partir do resíduo de cerâmica vermelha foi avaliada por meio da determinação do índice de atividade com cal, realizada a partir de ensaios para determinação da resistência à compressão de corpos de prova, conforme prescrito na NBR 5751:2012⁽⁵⁾. Os resultados da resistência à compressão obtidos para cada corpo de prova (resultados individuais), a resistência à compressão média dos três corpos de prova ensaiados para cada pozolana e o desvio relativo máximo dos resultados são apresentados na Tabela 3.

De acordo com a NBR 12653:2012⁽⁴⁾, para ser caracterizada como um material pozolânico a pozolana deve apresentar índice de atividade pozolânica com a cal, aos 7 dias de idade, superior a 6 MPa medido a partir do ensaio de resistência à compressão, com desvio relativo máximo entre os resultados individuais inferior a 6%. A partir dos resultados obtidos (Tabela 3), verifica-se que, independente do produto cerâmico de origem, todos os materiais avaliados podem ser considerados como material pozolânico, apresentando resistência à compressão maior a 6 MPa e desvio relativo máximo inferior a 6%.

Tabela 3 – Resultados do ensaio para determinação do índice de atividade pozolânica com cal.

Identificação da amostra	Resistência à compressão (MPa)				Desvio relativo máximo (%)
	CP 01	CP02	CP 03	Média	
1363/13	10,0	9,5	9,7	9,7	3,1
1364/13	8,8	9,3	8,7	8,9	4,5
1365/13	8,2	8,0	8,0	8,1	1,2
1366/13	9,4	9,3	9,4	9,4	1,1

CONCLUSÕES

O processo de moagem adotado para a obtenção de pozolana a partir de resíduos de cerâmica vermelha, com vista à sua utilização como adição mineral para produção de cimento e concreto, permitiu a obtenção de um material pozolânico com características e propriedades de acordo com os requisitos estabelecidos na norma correspondente.

Do ponto de vista de sua reatividade, a partir do índice de atividade pozolânica determinado em combinação com a cal, todas as pozolanas produzidas em laboratório podem ser consideradas como material pozolânico para utilização na produção de cimento e concreto. Cabe ressaltar que o produto cerâmico de origem (blocos de vedação ou telhas cerâmicas) não interferiu sobre a atividade pozolânica do material produzido.

REFERÊNCIAS

- (1) NEHDI, M.; MINDESS, S.; AİTCIN, P.-C. Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles. **Cement and Concrete Research**, v.28, n.5, p.687-697, 1998.
- (2) MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.
- (3) DAL MOLIN, D.C.C. Adições minerais. In: ISAIA, G.C. (editor). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. p.261-309.

- (4) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **NBR 12653**: materiais pozolânicos: requisitos, Rio de Janeiro, 2012, 5p.
- (5) 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, 4p.
- (6) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **NBR 7215**: cimento Portland: determinação da resistência à compressão, Rio de Janeiro, 1996, 8p.

EVALUATION OF THE REACTIVITY OF POZZOLANIC MATERIALS OBTAINED FROM HEAVY CLAY INDUSTRY WASTE

Abstract

The building construction has a fundamental role to achieving the global purposes of sustainable development, since the industry consumes large amounts of natural resources and generates large quantities of solid wastes and greenhouse gases, not only at the stage of raw materials extraction, as well in manufacturing, transportation, utilization, maintenance and disposal. The incorporation of mineral additions in cement and concrete production, in order to improve their performance and durability, has increased in recent years, and economic and environmental factors play an important role in this growth, since these additions are generally wastes or industrial by-products. In general, mineral additions are finely divided siliceous materials, normally added to cement and concrete in relatively large quantities, which interact chemically and physically with the cement hydration products, modifying their microstructure. In this context, the use of heavy clay industry waste becomes a possible alternative for applying this material as a mineral addition in cement and concrete, since it is composed mainly of clay minerals. However, for this waste chemically react with the cement hydration products, it must comply with chemical and physical requirements specified in the corresponding standards. In the present paper, the heavy clay industry waste, collected in pieces, was ground in laboratory for the production of pozzolan, potential material to be used as a mineral addition in cement and concrete production. In order to evaluate its potential for reactivity with the cement hydration products, tests were performed to determine the pozzolanic activity index with lime by means of mechanical tests. From the results, the materials tested can be considered as a pozzolanic material, and thus can be used as mineral addition for cement and concrete production.

Keywords: waste; heavy clay industry; pozzolan; cement; concrete.