Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

EFEITO DA ADIÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA, FILER CALCÁRIO E CINZA DE CASCA DE ARROZ NA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

C. DOS SANTOS ADORNO
Mestrando do PPGECC-UFPR
UFPR – Universidade Federal do Paraná
Paraná; Brasil
cleberadorno@yahoo.com.br

M. HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS
Professor do PPGECC-UFPR
UFPR – Universidade Federal do Paraná
Paraná; Brasil
medeiros.ufpr@gmail.com

J. HOPPE FILHO
Professor da UFOB
UFOB – Universidade Federal do Oeste da Bahia
Bahia; Brasil
juarez.hoppe@gmail.com

RESUMO

Estudos sobre a potencialidade reativa do resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e da cinza de casca de arroz (CCA) e seu uso na composição do cimento Portland evitando a inadequada disposição é um tema de forte relevância para a sustentabilidade ambiental da cadeia produtiva de um país. A análise da viabilidade da incorporação do RCV e CCA ao cimento Portland requer estudos que envolvam os efeitos sobre a resistência à compressão e, sobretudo, sobre o desempenho da matriz hidratada quando susceptível à ação de interações físico-químicas deletérias. O presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência da incorporação do RCV moído e da CCA na composição do cimento Portland sobre a resistência à ocorrência de reação álcali-sílica (RAS). Para isto, argamassas de cimento CP V – ARI (referência) e composições com a substituição de 10% do cimento, em massa, por fíler calcário, CCA ou RCV, com três diferentes finuras, foram avaliadas quanto à RAS, segundo a NBR 15.577-5/2008. Os resultados evidenciam que o RCV e a CCA causaram aumento na expansão por RAS. Por outro lado, a maior finura do RCV impacta, positivamente, no comportamento do material frente à degradação. O fíler calcário não influenciou o resultado de expansão por RAS. Com relação à RAS, há que se incrementar a cominuição do RCV moído por 1,5 horas para aproximar a sua distribuição granulométrica à distribuição do cimento, o que tende a potencializar a capacidade mitigadora desta adição mineral.

Palavras-chave: Reatividade álcali-sílica, cinza de casca de arroz, cimento Portland, resíduo de cerâmica vermelha.

ABSTRACT

Studies the reactive capability of red-clay waste (RCW) and rice rush ash (RRA) use in the admixture in Portland cement composition thus avoiding is a strong relevant issue to environmental sustainability in the production chain of a country. The viability of RCW and RRA incorporation in Portland cement requires analyses, such as studies of its compressive strength, and moreover of its performance when the hydrated paste is under physical and chemical deleterious interactions. This paper aims to evaluate the influence of milled RCW and RRA in Portland cement's composition, emphasizing its resistance to alkali-silica reaction (ASR). Therefore, CP V - ARI cement mortars (to be used as reference) and compositions of 10% replacement in cement mass by limestone filler, RRA or RCW, in three different fineness, were evaluated for ASR, according to NBR 15.577-5/2008. Results showed that RCW increased the expansion caused by ASR. On the other hand, a higher comminution of RCW and RRA tends to improve the performance of the cementitious matrix when submitted to deleterious action, that is, a greater fineness of RCW has a positive impact on the material behavior under degradation. The limestone filler did not influence the result of expansion by ASR. . Regarding the RAS, and increase in the comminution of RCW milled for 1.5 hours is required to make its particle size distribution similar to the cement's, which tends to enhance the mitigation capacity of this mineral admixture.

Keywords: alkali-silica reactivity, rice rush ash, Portland cement, red-clay waste.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

INTRODUÇÃO

As atividades de indústrias como a metalúrgica, a química, a petroquímica, a papeleira, a alimentícia, entre outras, geram resíduos importantes no que tange a sustentabilidade do meio ambiente. Estes resíduos são variados, sendo representados por plástico, papel, cinza, escórias, vidro, lodo, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, madeira, fibras, borracha, metais, cerâmica, entre tantos outros. Como o volume destes resíduos industriais é grande, a sua disposição adequada passou a ser primordial para a preservação do meio ambiente, sendo necessário o desenvolvimento de soluções para implantar tecnologias capazes de minimizar os impactos provenientes da disposição destes resíduos no ambiente e reduzir os custos envolvidos nessa atividade.
Dentro deste contexto, a construção civil é uma indústria geradora de grandes volumes de resíduos e, segundo Lucas e Benatti [1], ela pode ser considerada uma indústria largamente indicada para absorver resíduos sólidos. Dentro da construção civil, a reutilização dos resíduos sólidos pode ajudar a reduzir os custos e prejuízos ambientais relativos ao tratamento e/ou disposição final desses resíduos, e também na redução dos impactos ambientais decorrentes da extração de matéria-prima diretamente do ambiente. Assim, este setor industrial pode ter um papel relevante como receptor de resíduos sólidos no tocante à sua disposição final. A incorporação desses resíduos em matrizes cerâmicas e cimentícias com o objetivo de produção de artefatos para a construção civil, se feita de maneira criteriosa, permite dar um destino ambientalmente correto para resíduos que, de outra forma, seriam fontes de poluição [1].
Desse modo, qualquer estudo que foque a possibilidade de aproveitamento de resíduos gerados em seu próprio processo de produção é relevante, pois caso haja viabilidade, pode transformar-se em uma ferramenta importante para preservar recursos naturais, reduzir custos de produção das edificações e ainda melhorar alguma característica dos materiais comumente utilizados.
Dentro deste panorama, este trabalho visa divulgar informações sobre uma alternativa de aproveitamento de resíduo de cerâmica vermelha, proveniente de tijolos e blocos cerâmicos em compósitos de cimento Portland. Este tema tem sido estudado em alguns trabalhos [2-6], onde foram comparadas propriedades como: resistência à compressão, tração por compressão diametral, resistência à flexão, módulo de elasticidade, absorção de água, retração, porosidade aparente e variações dimensionais por oscilação de umidade. As comparações sempre são feitas entre concretos com agregados oriundos de resíduos de cerâmica e concretos moldados com agregados comumente utilizados.
Este trabalho também tem o intuito de produzir avanço no conhecimento sobre a possibilidade do aproveitamento da cinza de casca de arroz, outro resíduo industrial cujo descarte no meio ambiente é um passivo ambiental a ser resolvido, para a produção de concreto. Este resíduo tem sido muito estudado como pode-se exemplificar com os trabalhos de Cordeiro *et al* [7], Rodrigues e Beraldo [8] e Isaia *et al* [9], porém o seu efeito na ocorrência de reação álcali-sílica não é abordado com frequência nos estudos publicados até o momento.
Optou-se por focar o estudo no efeito da incorporação destes resíduos na capacidade de mitigar a reação álcali-sílica pelo fato de a grande maioria dos estudos sobre a incorporação destes dois resíduos em compósitos de cimento Portland estarem focados nas mudanças na resistência mecânica e eventualmente na absorção de água e penetração de cloretos. Porém, a consagração técnica de um resíduo a ser incorporado no concreto ou argamassa passa pela necessidade de um amplo estudo de investigação que envolva não só a resistência mecânica, mas também os diversos mecanismos de degradação que reconhecidamente podem atuar nas estruturas de concreto.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No estudo do efeito da incorporação de resíduo de cerâmica vermelha em compósito de cimento Portland utilizou-se um material cerâmico oriundo de rejeitos de blocos cerâmicos (tijolos de cerâmica vermelha). Os blocos passaram por um pré-beneficiamento em britador, como será descrito mais adiante. A cinza de casca de arroz empregada é proveniente da combustão controlada em caldeira com leito fluidizado na Geradora de Energia Elétrica Alegrete (GEEA).
O ensaio para avaliação da mitigação da reação álcali-sílica foi conduzido de acordo com a NBR 15.577-5/2008 [10]. As comparações foram realizadas empregando duas argamassas de referência, uma sem qualquer adição e outra com adição de fíler calcário. Para todos os casos, o percentual de substituição parcial do cimento foi fixado em 10% em massa. O teor de 10% de resíduo de cerâmica foi utilizado por representar a média da faixa de teores permissíveis (6 ~ 14%) para material pozolânico a ser incorporado na composição do cimento Portland do tipo CP II – Z, conforme a norma NBR 11.578/1991 [11]. No caso da cinza de casca de arroz, o valor de 10% de substituição parcial de cimento Portland foi adotado por este ser um valor usual para este tipo de material pozolânico de alta reatividade.

Materiais

Agregados
O agregado miúdo selecionado para o experimento, procedente da região metropolitana de Curitiba, foi caracterizado por Tiecher [12] e utilizado por Valduga [13], sendo classificado como granito proveniente de rocha potencialmente

reativa, com expansão entre 0,1% e 0,2% aos 16 dias, de acordo com especificações da ASTM C 1260/2007 [14]. Este mesmo agregado apresenta histórico de manifestações patológicas diagnosticadas como reação álcali-agregado em obras hidráulicas nacionais.
O agregado utilizado foi processado com o mínimo necessário de britagem, utilizando-se um aparelho de Abrasão Los Angeles. Com o peneiramento do material britado, obtiveram-se as faixas granulométricas requeridas na NBR 15.577-4/2008 [15], que são as retidas nas peneiras: 2,36 mm, 1,18 mm, 0,60 mm, 0,30 mm e 0,15 mm.

Cimento

O cimento Portland utilizado foi do tipo CP V – ARI (similar ao cimento tipo III – High Early Strength, conforme a ASTM C150), pois este é o mais utilizado em ensaios que visam medir a reatividade dos agregados quanto à reação álcali-sílica, além de ser o cimento com o menor teor de adições em fábrica.
As características químicas e físicas do cimento utilizado estão apresentadas na Tabela 1, obtidas empregando-se métodos de ensaio normalizados no país. Os dados de SiO_2, CaO, MgO, Fe_2O_3, Al_2O_3 e SO_3 foram obtidos por fluorescência de Raios-X. A massa específica do cimento é de 3,12 g/cm³, determinada de acordo com a NBR NM 23/2001 [16].

Tabela 1 - Resultados de caracterização do cimento CP V – ARI.

ANÁLISE QUÍMICA (%)										
Parâmetros	SiO_2	CaO	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SO_3	Perda ao Fogo	CaO Livre	Resíduo Insolúvel	Álcalis totais como Na_2Oe*
Resultados	18,34	59,72	5,35	2,52	4,12	3,05	3,2	1,49	0,63	0,62

ENSAIOS FÍSICOS											
Parâmetros	Exp. Quente	Início de pega	Fim de pega	Cons. Normal	Finura Blaine	Retido em		Resistência à compressão			
						# 200	# 325	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
	mm	h:min	h:min	%	m²/kg	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
Resultados	0,5	02:15	03:00	27,6	437	0,10	2,80	23,40	37,60	42,70	51,10

*Óxido de sódio equivalente (Na_2O_e)= Na_2O + 0,658 K_2O

Adições: resíduo de cerâmica, cinza de casca de arroz e fíler calcário

O material cerâmico utilizado é oriundo de blocos de cerâmica vermelha provenientes de olarias da região de Prudentópolis, PR. Os blocos foram triturados em britador de mandíbula da marca Furlan para obtenção de 100% de material passante pela peneira de abertura 4,8 mm. Após a britagem, o material passante na peneira 4,8 mm foi moído em moinho de bolas da marca Gardelini, durante os tempos determinados: 0,5; 1,0 e 1,5 horas. A massa específica média da cerâmica moída empregada neste estudo é 2,60 g/cm^3.
A cinza de casca de arroz é um material obtido pela combustão controlada em caldeira com leito fluidizado e apresenta massa específica de 2,12 g/cm^3.
O fíler calcário utilizado é proveniente da fábrica Itaú de Minas da Votorantim Cimentos, sendo normalmente utilizado na produção de cimentos e argamassas. A massa específica deste material é 2,70 g/cm³.
A composição química do material cerâmico, cinza de casca de arroz e do fíler calcário são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do material cerâmico, cinza de casca de arroz e fíler calcário.

MATERIAL	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)										
	SiO_2	CaO	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	K_2O	SO_3	TiO_2	ZnO	MnO	Álcalis totais como Na_2Oe*
Fíler calcário	2,97	78,03	15,06	0,44	1,73	0,31	1,21	-	-	0,11	0,20
Cinza de Casca de arroz	88,94	1,10	-	0,11	2,42	4,18	2,08	-	0,01	0,88	2,75
Material cerâmico	55,32	0,19	-	5,27	35,50	1,28	1,23	1,09	0,01	0,04	0,84

* Na_2Oe = Na_2O + 0,658 K_2O Observação: Não foi encontrado Na_2O nas amostras

Detalhamento dos ensaios

A caracterização física das adições e cimento deste trabalho foi realizada com a determinação das curvas

granulométricas por difração a laser e a área superficial específica pela técnica de BET. Já a atividade pozolânica das adições foi investigada com a determinação do índice de atividade pozolânica (IAP) com cal [17] e índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento [18], para quantificar o potencial reativo. Além disso, a difratometria de raios-X (DRX) foi empregada para a identificação das fases cristalinas e, também, do halo amorfo que sinaliza a potencialidade reativa das adições.
O método de IAP com cal prescreve a moldagem de três corpos de prova cilíndricos de ϕ50 x 100 mm e posterior ruptura à compressão, aos 7 dias. O ensaio foi realizado em argamassa moldada com a adição mineral em teste, areia normal da ABNT (234 g de cada fração 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm), 104 g de hidróxido de cálcio p.a. e a água necessária para se obter a consistência da argamassa em 225 ± 5 mm. A quantidade de adição é calculada de acordo com a Eq. 1.

$$m_{ad} = 2 \cdot \frac{ME_{ad}}{ME_{cal}} \cdot 104 \ \ (em\ gramas) \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Onde: m_{ad} é a massa da adição mineral em teste, ME_{ad} é a massa específica da adição, ME_{cal} é a massa específica da cal. O IAP com cal indica que a adição é pozolânica quando o resultado atingir, no mínimo, 6,0 MPa.

No caso do IAP com cimento Portland são preparadas uma argamassa de referência, que contém apenas cimento Portland, e mais uma para cada adição mineral em teste, de modo a se ter 35% do volume absoluto de cimento substituído pelo material pozolânico. Foram moldados três corpos de prova cilíndricos de ϕ50 x 100 mm para cada argamassa. A argamassa de referência é composta por 312 g de cimento Portland e 936 g de areia normal, dividida em iguais porções das quatro frações que a constitui, e a argamassa com o material possivelmente pozolânico é composta por 202,8 g de cimento, a massa da adição em teste, determinada por meio da Eq. 2, e 936 g de areia normal. A água utilizada em cada caso é a necessária para se obter a consistência da argamassa de 225 ± 5 mm. O cálculo da quantidade de adição mineral a ser utilizada na composição da argamassa para o IAP com cimento segue a Eq. 2.

$$m_{ad} = 109{,}2 \cdot \frac{ME_{ad}}{ME_{c}} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

Onde: m_{ad} é a massa da adição mineral em teste, ME_{ad} é a massa específica da adição, ME_{c} é a massa específica do cimento.

O preparo da amostra para a coleta do difratograma foi realizado por prensagem manual do pó no porta-amostra, seguido de exposição aos raios-X no difratômetro RIGAKU modelo Ultima IV. A mensuração foi realizada entre 5º e 75º 2θ, com passo angular de 0,02º 2θ e tempo por passo de 1 segundo. Na coleta se utilizou tubo com ânodo de cobre, 40 kV / 30 mA, e fenda divergente de 1º.

Reação Álcali-sílica (NBR 15.577-5/2008)

O experimento foi realizado de acordo com a NBR 15.577-5/2008 - Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado [10].
O procedimento de mistura das argamassas seguiu as recomendações da referida norma técnica no que diz respeito à ordem de mistura dos materiais, ao tempo de mistura, à moldagem das barras, aos procedimentos de cura inicial e desfôrma das barras de argamassa.
Segundo a NBR 15.577-4/2008 [15], a quantidade de cimento para o ensaio deve ser de 440 g e a de agregado de 990 g, representada pela soma das várias faixas granulométricas, para relação a/c = 0,47. Para este estudo foram mantidas as proporções de materiais recomendadas na norma, porém em quantidade total superior para viabilizar a moldagem de 6 barras de argamassa para cada série de ensaio de modo a proporcionar maior representação estatística dos resultados, pois a NBR 15.577-5/2008 [10] prescreve o uso de apenas 3 barras. Adotou-se o teor de substituição de 10% em relação à massa de cimento Portland, tanto para o fíler calcário como para a cinza de casca de arroz e a cerâmica vermelha, com os diferentes tempos de moagem. As quantidades de frações de agregados, cimento e adições encontram-se na Tabela 3.
As barras ficaram imersas todo período de ensaio em solução de NaOH p.a., na concentração de 40 g para cada litro de água destilada, empregando-se um banho termorregulador com temperatura controlada e mantida em (80 ± 2) ºC. Para cada idade de leitura, as barras foram retiradas das soluções e colocadas novamente dentro do banho termorregulador em um período máximo de 10 minutos.
A NBR 15.577-5/2008 [10] recomenda leituras iniciais, incluindo as idades de 16 e 30 dias. Visando uma avaliação mais completa da expansão das barras, foram realizadas leituras nos primeiros 66 dias, duas vezes por semana, incluindo o 16º e o 30º dias de ensaio. O aparato utilizado para as medições foi um pórtico metálico com um relógio comparador de comprimento, com precisão de 0,001 mm.

Tabela 3 - Proporção dos materiais utilizados no ensaio de reação álcali-sílica.

MATERIAL	QUANTIDADE	PORCENTAGEM
Cimento CP V ARI	792,0 g	90%
Adição mineral (fíler calcário, cinza de casca de arroz ou cerâmica moída)	88,0 g	10%
Material ligante (cimento + adição mineral)	880,0 g	100%
Água (a/c = 0,47)	413,6 g	---
Agregado miúdo	1.980,0 g	100%
Agregado retido # 2,36 mm	198,0 g	10%
Agregado retido # 1,18 mm	495,0 g	25%
Agregado retido # 0,60 mm	495,0 g	25%
Agregado retido # 0,30 mm	495,0 g	25%
Agregado retido # 0,15 mm	297,0 g	15%

* A argamassa de referência, sem adição mineral, contém 880 gramas de cimento CP V – ARI.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados estão divididos em: caracterização dos materiais e resultados de reação álcali-sílica, como apresentados a seguir.

3.1. Finura dos aglomerantes e fíler calcário

Os ensaios relacionados com a finura dos aglomerantes foram conduzidos por terem papel relevante no comportamento e reatividade do compósito de cimento Portland. O cimento, fíler calcário, cinza de casca de arroz e cerâmica moída para os três tempos de moagem (0,5; 1,0 e 1,5 horas), foram caracterizados quanto à distribuição granulométrica e área superficial específica BET.
A Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica dos materiais e, na Tabela 4, constam os resultados de determinação da área superficial específica pelo método BET e o diâmetro médio das partículas. A cinza de casca de arroz foi a adição com curva granulométrica mais próxima do cimento Portland. Por outro lado, a área superficial específica BET da cerâmica moída é cerca de 12 vezes maior que a área do cimento, independentemente do tempo de moagem. A área superficial específica BET do fíler calcário é 9 vezes menor que a cerâmica vermelha. Cabe destacar que o maior tempo de moagem e, consequentemente, a maior finura, não alterou significativamente a área superficial específica BET do RCV. Por outro lado, a técnica de granulometria a laser indicou que o tempo de moagem influencia a distribuição granulométrica dos grãos, com aumento da finura do material à medida que se elevou o tempo de moagem.

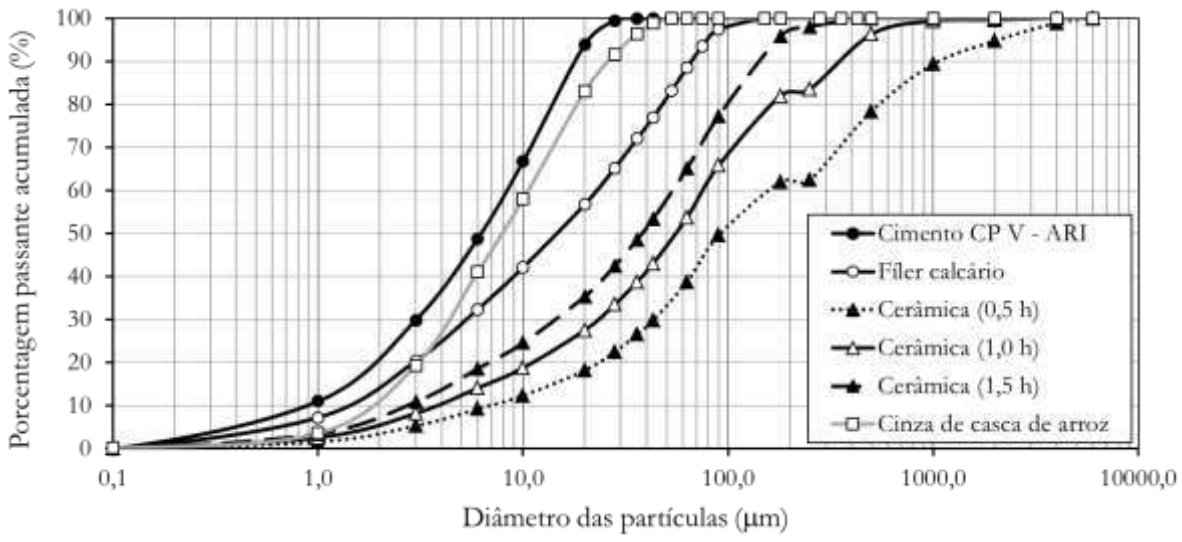


Figura 1: Distribuição granulométrica das adições em comparação com o cimento empregado.

Tabela 4 - Área superficial específica BET e diâmetro médio das partículas dos aglomerantes.

MATERIAL	ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA BET (M^2/G)	DIÂMETRO MÉDIO DAS PARTÍCULAS (μM)
Cimento CPV-ARI	1,1	6,3
Fíler calcário	1,4	15,4
Cinza de casca de arroz	14,7	8,1
Material cerâmico 0,5h	12,9	93,3
Material cerâmico 1,0h	13,0	56,1
Material cerâmico 1,5h	13,0	38,1

3.2. Atividade pozolânica das adições minerais

As técnicas usadas para investigar o potencial pozolânico dos resíduos provenientes de cerâmica vermelha e da cinza de casca de arroz foram: ensaio Chapelle modificado [19], IAP com cal [17] e IAP com cimento [18].

3.2.1. Ensaio Chapelle modificado

A Tabela 5 apresenta os valores do ensaio Chapelle modificado para as amostras de cerâmica com diferentes finuras e para a cinza de casca de arroz. No caso do fíler calcário, o método não é aplicável por não se tratar de um material silicoso, aluminoso ou sílico-aluminoso, ou seja, sem possibilidade de ser considerado pozolana devido a sua composição química.

Tabela 5 - Ensaio Chapelle, conforme a norma NBR 15.895/2010.

MATERIAL	TEOR DE $CA(OH)_2$ FIXADO (MG $CA(OH)_2$/G AMOSTRA)	INCREMENTO NA REATIVIDADE COM A FINURA (%)
Cinza de casca de arroz	1336	---
Material cerâmico 0,5h	454	---
Material cerâmico 1,0h	516	14,0
Material cerâmico 1,5h	537	18,0

Raverdy *et al.* [20] estudaram a fixação de cálcio por amostras de pozolanas obtendo o valor mínimo indicativo de 330 mg CaO/g amostra [ou 436 mg $Ca(OH)_2$/g amostra] para um material ser considerado potencialmente pozolânico. Neste estudo, os ensaios eram realizados empregando-se a proporção 1:1 (CaO:pozolana).
Recentemente, as normas brasileira e francesa, respectivamente, NBR 15.895/2010 [19] e NF P18.513/2012 [21] foram revisadas e incorporaram uma modificação significativa ao adotar a proporção de 2:1 (CaO:pozolana), com ganho na eficiência do ensaio e o resultado passou a ser expresso em mg $Ca(OH)_2$/g pozolana.
A reatividade do RCV nas diferentes finuras, determinada pela NBR 15.895/2010 [19], indicou, com base no limite mínimo proposto por Raverdy *et al.* [20] (436 mg $Ca(OH)_2$/g pozolana), que as amostras analisadas possuem alguma reatividade, com valores próximos ao limite mínimo. Cabe destacar que a moagem incrementou o consumo de cal do RCV, apesar da área superficial específica BET não ter variado consideravelmente com a cominuição.
O resultado de $Ca(OH)_2$ fixado pela cinza de casca de arroz foi mais do que o dobro da apresentada pelo resíduo de cerâmica vermelha, o que indica a elevada atividade pozolânica deste tipo de resíduo.

3.2.2. Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal

Os resultados do índice de atividade pozolânica (IAP) com cal para o fíler calcário, a cinza de casca de arroz e para o material cerâmico constam na Figura 2. A relação água/materiais ligantes (hidróxido de cálcio + adição mineral) da argamassa com fíler calcário foi de 0,54, no caso da cinza de casca de arroz foi de 0,66, enquanto para o RCV, independentemente da finura, a relação foi de 0,38. A argamassa com adição mineral inerte, apresentou resistência à compressão abaixo do mínimo de 6,0 MPa preconizado pela NBR 12.653/2012 [22]. De fato, este comportamento previsível evidencia não haver atividade química significativa entre o hidróxido de cálcio e o fíler calcário e, desta forma, esta adição não é classificada como pozolana. As argamassas com adição de material cerâmico, independentemente do tempo de moagem, também apresentaram resistências à compressão inferiores ao mínimo preconizado pela norma, indicando, por esta metodologia, que tal adição, independente dos níveis de finura usados neste trabalho, não pode ser classificada como pozolana. Estes resultados estão compatíveis com os obtidos por Oliveira *et al.* [6] quanto à classificação de atividade pozolânica, porém estão contra os resultados apresentados por Garcia *et al.*

[23]. No caso da cinza da casca de arroz, esta adição foi classificada como uma pozolana, apesar de que o resultado foi no limiar de pozolanicidade, que é um resultado contraditório com os dados obtidos no ensaio Chapelle modificado (de acordo com a NBR 15.895/2010) [19] que indicou elevada pozolanicidade deste material.

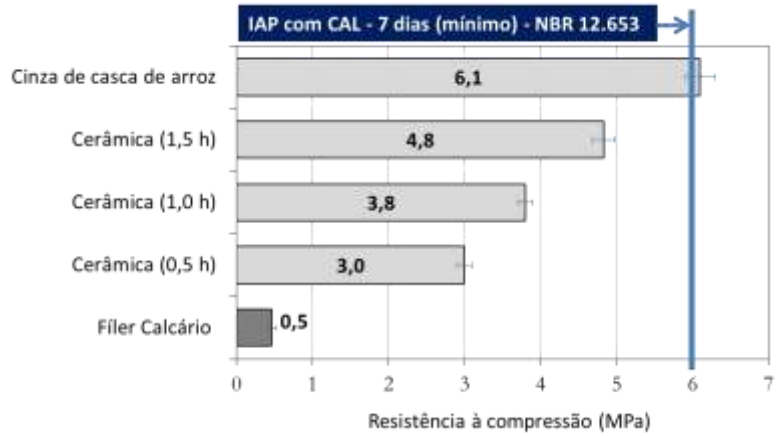


Figura 2: Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal.

3.2.3. Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cimento Portland

O ensaio conforme a NBR 5.752/2012 [18] (IAP com cimento Portland) requer que as argamassas disponham, no estado fresco, de consistência pré-estabelecida (225 ± 5 mm), o que resulta em variados volumes de água de amassamento em função das características físico-químicas das adições minerais. A norma NBR 12.653/2012 [22] estabelece como limite um adicional de 10 a 15% sobre o volume de água de mistura da argamassa de referência, o que impacta na resistência à compressão da argamassa. A Figura 3 apresenta a demanda de água das argamassas quando da substituição parcial do cimento por fíler calcário, cinza de casca de arroz ou RCV com as diferentes finuras. A argamassa de referência, somente com cimento, foi moldada na relação água/cimento igual a 0,48 (150 gramas de água). O fíler calcário aumentou em 6% a demanda de água em comparação à argamassa de referência, enquanto a cerâmica vermelha, com as diferentes finuras, reduziu a demanda, em média, para um proporcional de 75% e a cinza de casca de arroz aumentou a demanda de água para 121% da água requerida para a série de referência. De fato, a redução na demanda de água por parte da cerâmica vermelha potencializa a resistência à compressão da argamassa, a ser avaliada a seguir.

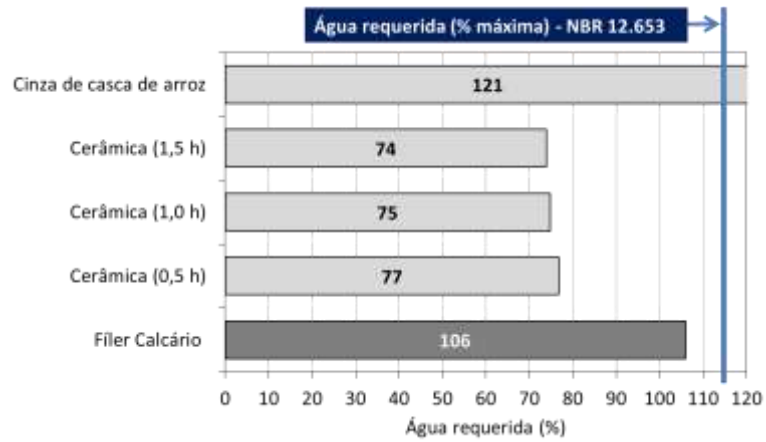


Figura 3: Demanda percentual de água de amassamento das argamassas de cimento Portland contendo adições minerais em relação à argamassa de referência.

A Figura 4 mostra os dados de resistência à compressão das argamassas de cimento Portland com e sem o fíler calcário, com cinza de casca de arroz e com os materiais cerâmicos. A argamassa de referência atingiu, em média, a resistência à compressão de 41,1 MPa, enquanto a substituição de 35% do volume de cimento por fíler calcário reduziu a resistência para aproximadamente 23,2 MPa. A norma NBR 12.653/2012 [22] estabelece um percentual mínimo de 75% da resistência à compressão da argamassa de referência para atribuir potencial pozolânico à adição mineral ensaiada. Assim sendo, para o cimento estudado, as argamassas com adições minerais devem atingir uma resistência mínima de

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

30,8 MPa, o que não ocorreu com a argamassa contendo filer calcário, nem tampouco, com as amostras contendo material cerâmico. Portanto, não são consideradas pozolanas, estando este resultado de acordo com o ensaio de IAP com cal. Para a cinza de casca de arroz o valor médio foi de 38,8 MPa, ou seja, foi classificada como adição pozolânica com certa folga.
Cabe destacar que a cerâmica moída por 1,5 horas atingiu resistência à compressão próxima ao valor limite para a classificação como pozolana. Este comportamento está relacionado, principalmente, à menor demanda de água de mistura para atingir a consistência pré-estabelecida na metodologia normativa, embora de acordo com os resultados do ensaio Chapelle modificado seja evidente que há influência da interação química da cerâmica vermelha com a portlandita. Como a variação na demanda de água de mistura nas três argamassas com cerâmica vermelha é muito pequena, o que está condizente com os resultados da área superficial específica BET, o incremento na resistência à compressão deve estar associado à maior interação das partículas da adição com o hidróxido de cálcio, com decorrente formação de um teor maior de silicato de cálcio hidratado, responsável direto pela capacidade portante do material.

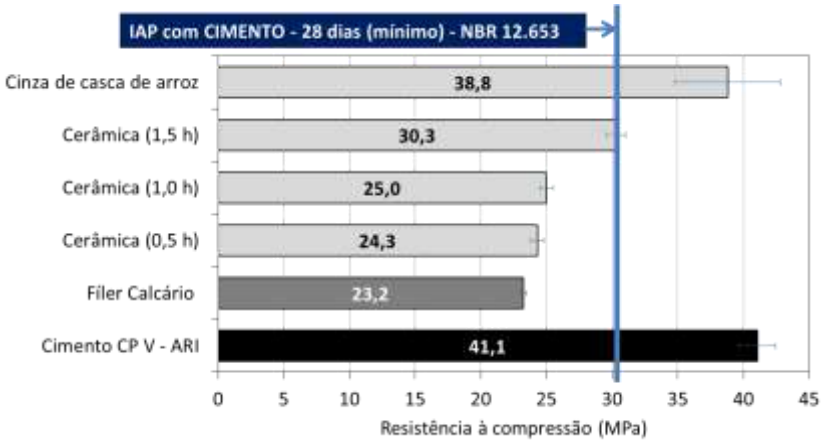


Figura 4: Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento.

A Figura 5 apresenta o difratograma de raios-X do fíler calcário. Usando os dados do International Centre for Diffraction Data (ICDD) para identificação dos constituintes desta adição, foram encontrados picos característicos que indicam a presença de calcita ($CaCO_3$), dolomita ($CaCO_3.MgCO_3$) e quartzo (SiO_2). Na amostra de material cerâmico (difratograma da Figura 6) foram encontrados picos típicos que revelam a existência de quartzo (SiO_2), ilita ($K.Al_2.(Si_3.Al).O_{10}.(OH)_2$) e hematita ($Fe_2O_3$).
No fíler calcário não há evidência da presença de halo amorfo no difratograma, evidenciando que tal adição apresenta um elevado grau de cristalinidade. Apesar disto, devido à finura do material, este pode ser utilizado como material de enchimento, melhorando o empacotamento das partículas nas misturas e contribuindo para melhor densificação dos compósitos cimentícios. A cerâmica vermelha apresenta um tênue halo amorfo, coerente com a sua restrita capacidade de reação com a cal, formando compostos hidratados, como verificado pelo ensaio Chapelle [21] e também no IAP com cal [19] e no IAP com cimento [20].
A análise química da cinza de casca de arroz mostra que praticamente 89% deste material é formado por sílica (SiO_2), porém, o fator determinante da reatividade pozolânica de um material depende do grau de amorficidade da sílica que o compõe. A Figura 7 mostra o difratograma de raios X deste material que indica que a sílica desta cinza está em sua grande maioria em estado vítreo e uma pequena parcela está organizada como cristobalita, uma das formas polimórficas do dióxido de silício. O principal indício do caráter amorfo deste material é a apresentação do halo amorfo destacado na Figura 7. Deve-se verificar que o tamanho do halo amorfo da cinza de casca de arroz (CCA) é muito mais insinuado do que o apresentado pelo resíduo de cerâmica vermelha (RCV), sendo este um fator determinante para explicar o fato de a CCA ter apresentado resultados bem acima do limite mínimo no ensaio de IAP com cimento.

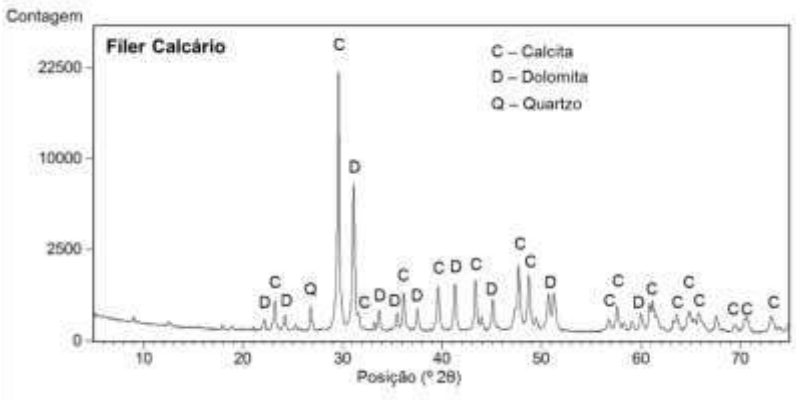


Figura 5: Difratograma de raios-X da amostra de fíler calcário.

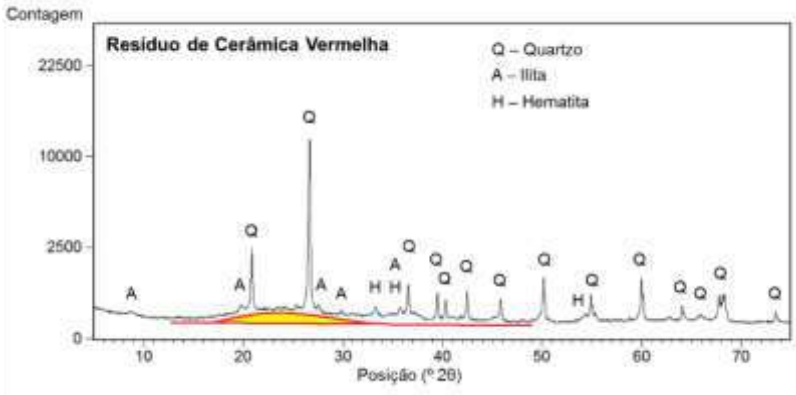


Figura 6: Difratograma de raios-X da amostra de material cerâmico.

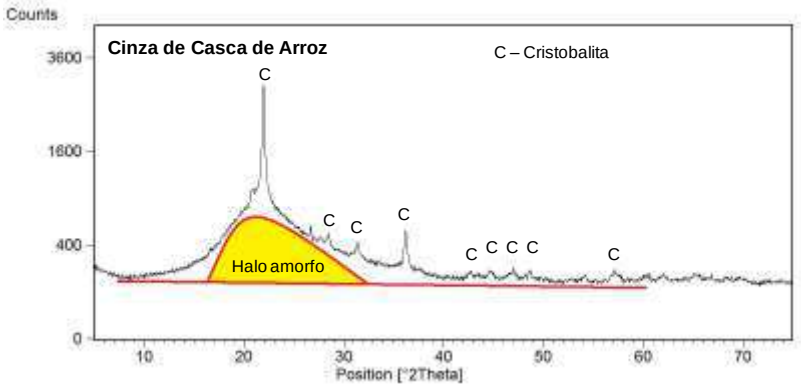


Figura 7: Difratograma de raios X da amostra de cinza de casca de arroz.

3.3 Reação álcali-sílica

A evolução da expansão das barras de argamassa devido à reação álcali-sílica ao longo de 66 dias está apresentada na Figura 8. A argamassa de cimento CP V – ARI, considerado cimento-padrão conforme as recomendações da NBR 15.577-4/2008 [15], foi utilizada para classificar, de acordo com os critérios da NBR 15.577-1/2008 [24], a potencialidade inócua ou reativa do agregado empregado neste experimento. Como a expansão aos 30 dias (0,15%) foi inferior à expansão limite de 0,19% estabelecida na referida norma, o agregado seria classificado como potencialmente inócuo para uso em concreto. Vale salientar que o agregado utilizado neste experimento tem histórico de apresentar RAS em uma edificação nacional de barragem, cujo nome não se tem autorização para informar neste documento. A NBR 15.577-1/2008 [24] indica que nos casos em que haja histórico de RAA, o agregado deve ser considerado potencialmente reativo, então esta é a efetiva classificação do agregado.

Além disso, Tiecher [12] e Valduga [13] por meio da norma ASTM C 1260/2007 [14] também atribuíram potencialidade reativa a este mesmo agregado. De acordo com esta norma americana, deve-se considerar a possibilidade deste agregado apresentar reação álcali-sílica em virtude da expansão, aos 14 dias, situar-se na região de incerteza estabelecida pela norma americana[1], o que requer, preventivamente, a adoção de medidas mitigadoras.

A influência das adições minerais deste trabalho na mitigação da expansão das argamassas, conforme as recomendações da NBR 15.577-1/2008 [24], deve ser avaliada na idade de 16 dias, quando a expansão deve ser inferior a 0,10%. Neste estudo, além da idade recomendada pela norma, optou-se pelo monitoramento do comportamento das argamassas em idades maiores, a fim de melhor avaliar a influência do RCV e da cinza de casca de arroz (Figura 8), onde também estão apresentados os resultados de expansão, aos 16 dias, das argamassas contendo os diferentes materiais ligantes. De fato, o cimento CP V – ARI, utilizado como padrão, resultou em um sistema com expansão superior ao limite recomendado pela norma.

A utilização do fíler calcário na composição do material ligante aparentemente atribuiu potencial de mitigação a esta adição, embora, estatisticamente, o resultado possa ser considerado idêntico ao valor limite de 0,10%. Os efeitos físicos do fíler calcário interferem na microestrutura da matriz hidratada, o que propiciou redução da expansão da argamassa.

Apesar de ter sido classificado como adição pozolânica, o ensaio representado na Figura 8 mostra que a cinza de casca de arroz elevou de forma acentuada a expansão por RAS.

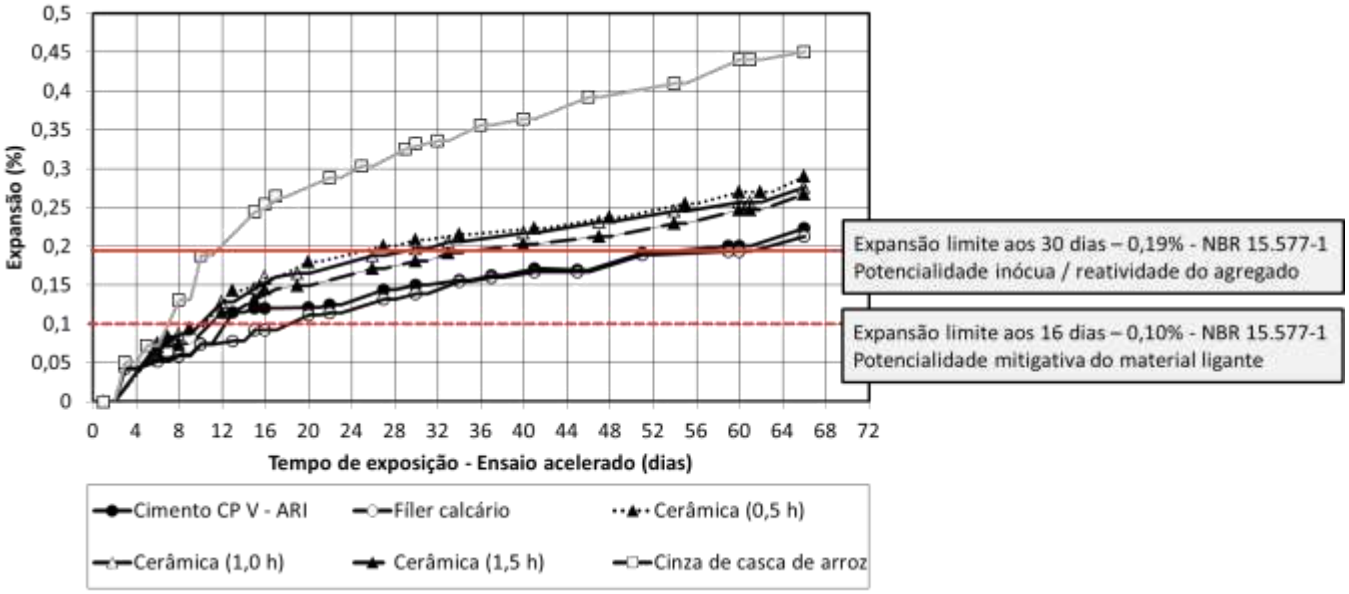


Figura 8: Reação álcali-sílica - evolução da expansão média das barras de argamassa com 100 % de cimento comparado com substituição de 10% do cimento por adições minerais.

O RCV, independentemente da finura, além de não mitigar a reação álcali-sílica, propiciou a expansão da argamassa a valores superiores ao observado na referência. O maior tempo de moagem do resíduo de cerâmica vermelha tendeu a reduzir a expansão da argamassa.

A análise geral, ao longo de 66 dias, mostra que o comportamento expansivo da argamassa com fíler calcário tende a se equiparar à série de referência após 20 dias, mantendo esta tendência ao longo do período estudado. Já a série contendo RCV, nas diferentes finuras, tende a manter maior expansão em comparação à série de referência para as idades avaliadas. De fato, a maior expansão ocorre sempre na amostra de resíduo de cerâmica vermelha com menor tempo de moagem.

Cabe salientar que a utilização de RCV, nos tempos de moagem de 0,5 e 1,0 hora, atribuiu potencialidade reativa às respectivas argamassas, pois estas superaram o valor limite de expansão de 0,19% aos 30 dias. A argamassa contendo o resíduo moído por 1,5 horas apresentou expansão próxima ao limiar normativo para a referida idade, o que atribui a esta adição mineral incerteza sobre a sua adequabilidade para a mitigação da reação álcali-sílica. Resumindo, o resíduo de cerâmica vermelha potencializa a expansão da argamassa quando da presença de álcalis na solução aquosa dos poros da matriz hidratada.

[1] A norma ASTM C 1260/2007 estabelece a expansão de 0,10% aos 14 dias como limite para considerar o agregado inócuo, até 0,20% aos 28 dias para potencialmente reativo e acima de 0,20% aos 28 dias para agregado reativo.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

CONCLUSÕES

O foco deste trabalho foi investigar o efeito da incorporação de RCV e de cinza de casca de arroz para a execução de concretos e argamassas de cimento Portland submetidos a condições favoráveis para a ocorrência da RAS. Os resultados obtidos nos ensaios permitem as seguintes conclusões:

- O RCV foi classificado como adição mineral pozolânica quando avaliado por meio do ensaio Chapelle modificado, apesar dos resultados dos ensaios indiretos de avaliação da atividade pozolânica (IAP com cal e IAP com cimento) não atribuírem pozolanicidade ao material cerâmico, independentemente da finura. O maior tempo de moagem do RCV incrementou o consumo de cal por atividade pozolânica e a resistência à compressão das argamassas de cal ou cimento.
- A potencialidade pozolânica do RCV requer adequada cominuição do material para que este cumpra, também, os requisitos classificatórios relacionados à resistência à compressão. Esta tendência ficou evidente nos resultados de IAP com cal e IAP com cimento Portland.
- O maior tempo de moagem da RCV aumenta o empacotamento das partículas e, consequentemente, a resistência à compressão da argamassa.
- Com base nos dados de granulometria a laser, conclui-se que quanto maior o tempo de moagem do RCV, mais fino o material, indicando que não foi atingido o tempo de redução de eficiência de moagem relatado por Luz *et al.* [25] e Bristot [26], que é o limite de tempo de moagem em que mesmo aumentando o tempo de operação do moinho, a curva granulométrica do pó produzido não indica aumento do teor de grãos mais finos.
- O fíler calcário não reduziu de forma significativa os efeitos da RAS, apesar de promover redução da portlandita e alteração no nível de empacotamento de partículas. De modo geral, pode-se considerar que a série com fíler calcário e a série de referência são equivalentes.
- No caso do RCV, os valores de expansão por RAS, em todos os casos, foram superiores aos apresentados pela série de referência, indicando que este material não é recomendado para uso em concretos empregados em conjunto com agregado reativo.
- A cinza de casca de arroz apresentou atividade pozolânica comprovada em todos os testes de pozolanicidade, porém, no ensaio de RAS apresentou aumento de expansão, contrário ao consenso geral de que a adição de pozolanas tende a ser um meio para mitigar a RAS. Este resultado mostra que a capacidade de mitigação da RAS depende da pozolana a ser usada, necessitando de testes específicos para cada caso de aplicação em campo.

Por fim, o tempo de avaliação dos ensaios acelerados propostos nas normas de RAS pode ser muito curto, pois nas idades mais avançadas, os resultados indicaram tendências diferentes e mais conclusivas quando comparados aos resultados obtidos nas idades estabelecidas nas respectivas normas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná (DCC-PPGECC-UFPR), da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

BIBLIOGRAFIA

[1] Lucas, D.; Benatti, C. "Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil". *Rama: Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 1, 2008, 405-418 p.

[2] Senthamarai, R. M.; Manoharan, P. D. "Concrete with ceramic waste aggregate", *Cement and Concrete Composites*, v. 27, 2005, pp. 910–913.

[3] Senthamarai, R. M. *et al*, "Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties", *Construction and Building Materials*, v. 25, 2011, pp. 2413–2419.

[4] Cabral, A. *et al*, "Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha", *Cerâmica*, v. 55, 2009, pp.448–460.

[5] Brito, J. *et al*, "Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates", *Cement and Concrete Composites*, v. 27, 2005, pp. 429–433.

[6] Oliveira, L. *et al*, "The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars componentes", *Construction and Building Materials*, v. 31, 2012, pp. 197–203.

[7] Cordeiro G. e*t al*, "Influência da substituição parcial de cimento por cinza ultrafina da casca de arroz com elevado teor de carbono nas propriedades do concreto". *Ambiente Construído (Online)*, v. 9, 2009, pp. 37-49.

[8] Rodrigues, M.; Beraldo, A., "Caracterização física e mecânica de argamassas à base de cimento Portland e cinza de casca de arroz residual". *Engenharia Agrícola (Impresso)*, v. 30, 2010, 193-204 p.
[9] Isaia, G. *et al*, "Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural. Parte I: propriedades mecânicas e microestrutura ISSN 1678-8621". *Ambiente Construído (Online)*, v. 10, 2010, 37-49 p.
[10] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15.577-5: "Reação álcali-agregado. Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado". Rio de Janeiro, 2008.
[11] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11.578: "Cimento Portland composto". Rio de Janeiro, 1991.
[12] Tiecher, F. "Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de rochas do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado". *Exame de qualificação para obtenção do título de Mestre – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre, 2005.
[13] Valduga, L. "Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado". *Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre, 2007.
[14] ASTM C - 1260/07: "Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method)". Philadelphia, Section 4 (Construction), v. 04.02 (Concrete and aggregates), 2007, pp. 647-650.
[15] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15.577-4: "Reação álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado". Rio de Janeiro, 2008.
[16] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 23: "Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica". Rio de Janeiro, 2001.
[17] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5.751: "Materiais pozolânicos — Determinação da atividade pozolânica — Índice de atividade pozolânica com cal — Método de ensaio". Rio de Janeiro, 2012.
[18] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5.752: "Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias". Rio de Janeiro, 2012.
[19] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15.895: "Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado". Rio de Janeiro, 2010.
[20] Raverdy, M. *et al*, "Appréciation de l' ativité pouzzolanique des constituants secundaries". *In: Congrés Internacional de la Chimie des Ciments*, Paris, 7ª e., v.II e IV, 1980.
[21] Association Française de Normalisation. NF P 18-513: "Métakaolin, addition pouzzolanique pour bétons" – *Définitions, specifications, critères de conformité*, 2012. 19 p.
[22] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12.653: "Materiais pozolânicos — Requisitos". Rio de Janeiro, 2012.
[23] Garcia, E. *et al*, "Resíduo de cerâmica vermelha (RCV): uma alternativa como material pozolânico" *Revista Cerâmica Industrial*, v. 19, nº 4, 2014, pp. 31 – 38.
[24] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15.577-1: "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.
[25] Luz, A. *et al*, "Tratamento de Minérios". *CETEM: 4ed*, Rio de Janeiro, 2004.
[26] Bristot, V. "Ferramental para prensagem hidráulica de esferoides de alumina". *Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre, 2008, 91 p.