

Ação conjugada de sílica de casca de arroz e hidróxido de cálcio em compósitos de cimento Portland: porosidade, compostos hidratados, reserva alcalina e resistência à compressão

Conjugated action of rice husk ash and calcium hydroxide in Portland cement composites: porosity, hydrated compounds, alkaline reserve and compressive strength

Pamela Albino Campos¹ , Marcelo Henrique Farias de Medeiros¹, Juarez Hoppe Filho²

¹Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Departamento de Construção Civil. Avenida Coronel Francisco Heráclito dos Santos, Jardim das Américas, Bloco III, 81.531-980, Curitiba, PR, Brasil.

²Universidade Federal do Oeste da Bahia, Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. Rua da Prainha, 1326, Morada Nobre, 47810-047, Barreiras, BA, Brasil.

e-mail: pamelaalbino015@gmail.com, medeiros.ufpr@gmail.com, juarez.hoppe@gmail.com

RESUMO

A sílica de casca de arroz (SCA) é uma pozolana de grande potencial reativo que, ao ser adicionada em sistemas cimentícios, promove a redução da reserva alcalina. Dentro desse contexto, a incorporação de hidróxido de cálcio (CH) visa atenuar o impacto na reserva alcalina causado pela pozolana. O presente estudo visa analisar a influência da incorporação conjunta de SCA e CH (em diferentes teores) em sistemas cimentícios, sob os aspectos físico-químico e mecânico. Os resultados indicaram que a SCA em substituição parcial ao cimento provoca um retardo no ganho de resistência à compressão, porém não é prejudicial em idades mais avançadas. Também foi verificado que a SCA tende a aumentar a porosidade aparente do sistema. Em geral, a presença de SCA resultou na redução do teor de hidratos formados. A reserva alcalina foi reestabelecida quando os teores de SCA e CH foram iguais. O aumento da disponibilidade alcalina aumentou o teor de CH fixado por atividade pozolânica da SCA. A proporção de 10% de SCA e 15% de CH foi a combinação que melhor explorou o potencial reativo da pozolana, além de ter sido capaz de manter a porosidade e a reserva alcalina semelhantes à amostra de referência.

Palavras-chave: Sílica de casca de arroz; reserva alcalina; atividade pozolânica.

ABSTRACT

Rice husk ash (RHA) is a pozzolan with high reactive potential that, when added to cementitious systems, promotes the reduction of the alkaline reserve. Within this context, the incorporation of calcium hydroxide (CH) aims to attenuate the impact on the alkaline reserve caused by the pozzolan. The present study aims to analyze the influence of the joint incorporation of SCA and CH (in different contents) in cementitious systems, under the physical-chemical and mechanical aspects. The results indicated that SCA in partial replacement of cement causes a delay in the gain in compressive strength, but is not harmful at older ages. It was also verified that SCA tends to increase the apparent porosity of the system. In general, the presence of SCA resulted in a reduction in the content of hydrates formed. The alkaline reserve was reestablished when the levels of SCA and CH were equal. The increase in alkaline availability increased the CH content fixed by the pozzolanic activity of SCA. The proportion of 10% SCA and 15% CH was the combination that best explored the reactive potential of the pozzolan, in addition to being able to maintain the porosity and alkaline reserve similar to the reference sample.

Keywords: Rice husk ash; Alkaline reserve; Pozzolanic activity.

1. INTRODUÇÃO

A sílica de casca de arroz (SCA) é uma pozolana que tem seu potencial reativo atrelado à fração amorfa, ao tamanho e à área superficial das partículas. Desse modo, é possível melhorar a qualidade deste material submetendo-o à queima e moagem controladas [1–4].

O emprego da SCA como material alternativo ao cimento Portland em matrizes cimentícias resulta em diversas mudanças físico-químicas. Os parâmetros químicos alterados quando da substituição parcial do cimento Portland pela SCA são o teor de água quimicamente combinada (AQC) e o teor de portlandita remanescente do sistema [5].

O teor de AQC está intimamente ligado à formação de compostos hidratados, que, em sistemas cimentícios, se referem à formação de C-S-H, AFt, AFm e Hgt (hidrogranada). Uma vez que os cristais de C-S-H são os principais responsáveis pela resistência mecânica, esse parâmetro pode ser um indicativo dos efeitos causados no comportamento mecânico do material [6].

Em sistemas contendo somente cimento Portland, a presença de C-S-H se deve exclusivamente à hidratação das fases silicato (C_3S e C_2S). Quando a SCA é adicionada em substituição parcial ao cimento, o teor de C-S-H oriundo da hidratação do cimento é naturalmente reduzido pela redução da quantidade de clínquer no compósito. Em contrapartida, devido ao caráter pozolânico da SCA, novas reações químicas passam a contribuir no teor de C-S-H formado, alterando, conseqüentemente, o teor de AQC final.

Além da alteração na quantidade de C-S-H, a presença de SCA também altera a estequiometria desse composto. O C-S-H é um composto que reconhecidamente não possui estrutura química bem definida, sendo variável de acordo com a relação Ca/Si inicial, a relação a/c, o grau de hidratação do cimento, entre outros fatores [7].

Quando a SCA é incorporada ao sistema, a relação Ca/Si é alterada, modificando a composição do C-S-H. Estudos relatam que a presença de menor quantidade de cristais de CH na mistura pode favorecer a precipitação de cristais de C-S-H com relações Ca/Si mais baixas. Contudo, é difícil analisar as modificações causadas pela presença da pozolana devido à heterogeneia própria do composto [8,9].

O uso de SCA em substituição parcial ao cimento Portland também promove alteração na estrutura dos poros do sistema. Sabe-se que a fração sólida de um sistema cimentício hidratado advém das reações químicas do cimento, que formam produtos com aproximadamente o dobro de volume dos reagentes. Contudo, o mesmo não ocorre para a SCA que, ao reagir com o hidróxido de cálcio, forma produtos com volume semelhante aos reagentes [10]. Uma vez que a porosidade de um sistema está atrelada ao volume de vazios em relação ao volume total, há uma alteração intrínseca na porosidade devido ao material utilizado, visto que a SCA possui uma estrutura bastante porosa [11,12].

Alguns autores como Rêgo *et. al.* (2015), Adesina e Olutoge (2019) e Shatat (2016) obtiveram um aumento da porosidade dos sistemas usando SCA. Contudo, o aumento da porosidade causado pela substituição do cimento por SCA não é um consenso na literatura. Há diversos estudos que relatam a redução da porosidade em sistemas contendo SCA, isso porque outros efeitos ocorrem de modo concomitante [11–16].

Além da alteração do volume de sólidos da mistura devido a presença de SCA, a mesma também atua como ponto de nucleação, propiciando a dispersão dos grãos de cimento anidro, o que favorece o aumento do grau de hidratação. Ademais, devido a sua estrutura porosa, os grãos de SCA também são capazes de absorver e armazenar a água de mistura nas primeiras idades, liberando-a posteriormente, quando a umidade relativa do sistema reduz, o que permite o prosseguimento da hidratação dos grãos de cimento por períodos mais longos. [5,12,17–20].

Desse modo, os estudos indicam que a porosidade de um compósito que contém SCA não é resultado de uma única ação, mas sim, do efeito sinérgico das alterações causadas pela presença do material alternativo [5, 10,11,13,17,18].

Embora existam divergências em relação ao efeito da SCA no volume total de poros do sistema, é um consenso que o uso de SCA provoca um refinamento dos poros, reduzindo consideravelmente seus diâmetros, agindo, sobretudo, nos poros capilares, além de reduzir a conectividade entre os mesmos [5,12,17].

Fisicamente, pode-se atribuir a redução do diâmetro dos poros à finura do material, que contribui para um melhor empacotamento de partículas, ação comumente conhecida como efeito filler. Quimicamente, além da melhoria do grau de hidratação do cimento, há a ocorrência das reações pozolânicas propriamente ditas [12,19].

A redução da conectividade dos poros é de grande valia para a durabilidade dos materiais, uma vez que dificulta a entrada da água para o interior do sistema, que muitas vezes é utilizada como meio de transporte por agentes agressivos, como cloretos e sulfatos. A presença de água também é imprescindível para a ocorrência de reações químicas que são prejudiciais à durabilidade do material, como a carbonatação [11,20,21].

Contudo, ainda que a presença de SCA propicie uma barreira física mais eficiente à entrada de agentes deletérios, a SCA pode reduzir a resistência química do material quando submetido à carbonatação. Isso porque, ao incorporar materiais pozolânicos na composição do cimento Portland, ocorre a redução do teor de hidróxido de cálcio em virtude da atividade pozolânica [22].

Desse modo, a redução do teor de hidróxido de cálcio disponível no sistema permite que o dióxido de cálcio (CO_2) encontre menor resistência à penetração, avançando mais rapidamente para o interior do material [23,24].

As mudanças no material causadas pelo processo de carbonatação exigem ainda mais cautela em se tratando de concreto armado, visto que a redução do pH do meio promove a despassivação da armadura, propiciando o início da corrosão [23].

Diante disso, diversos estudos abordam tentativas de repor a reserva alcalina consumida pela ação pozolânica. Contudo, esse é um processo complexo devido à reatividade da SCA ser influenciada pela própria disponibilidade de hidróxido de cálcio do sistema, de modo que, quanto maior a disponibilidade alcalina, maior é a quantidade de CH fixada pela SCA. Assim, sistemas com menores teores de SCA podem consumir quantidades totais de CH similares a sistemas com maiores teores de SCA [2,12,25,26].

Dessa forma, a incorporação de cal hidratada como tentativa de repor a reserva alcalina dos sistemas cimentícios pode contribuir para o melhor aproveitamento do potencial reativo da SCA. Porém, para ser eficiente com vistas à durabilidade, é necessário que a incorporação seja realizada em uma proporção que permita o aumento efetivo da reserva alcalina [2,12].

Nesse contexto, o objetivo do presente estudo é avaliar a disponibilidade alcalina de misturas com diferentes teores de substituição do cimento Portland por SCA. Também será utilizado o hidróxido de cálcio p.a. como fonte alternativa de CH, avaliando a influência da disponibilidade alcalina no consumo de CH.

O enfoque é compreender a ação conjugada de ambos materiais alternativos (SCA e CH) em sistemas cimentícios, a fim de respaldar a escolha de proporções que diminuam o uso do clínquer e propiciem o uso de materiais alternativos de forma otimizada. De fato, a reposição do teor remanescente de hidróxido de cálcio pela adição de reagente analítico ou cal hidratada é uma das formas de atenuar o avanço da frente de carbonatação no concreto, porém outros fatores intervenientes exercem influência na cinética de reação. O teor de compostos hidratados formados e a porosidade aparente são fatores relevantes e serão explorados no presente estudo. As alterações microestruturais que interferem na carbonatação do concreto vão além do teor remanescente de portlandita e, portanto, precisam ser exploradas de forma a ampliar o conhecimento acerca das medidas que podem ser adotadas para fomentar a utilização de materiais cimentícios suplementares sem comprometer a durabilidade do concreto frente à ação do anidrido carbônico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

2.1.1. Sílica de casca de arroz

A sílica de casca de arroz utilizada era proveniente de combustão controlada em caldeira com leito fluidizado na Geradora de Energia Elétrica Alegrete (GEEA), localizada no município de Alegrete/RS.

O potencial reativo da sílica de casca de arroz foi analisado qualitativamente por meio da difratometria de raios-X (DRX), apresentada na Figura 1. O perfil difratométrico evidenciou a presença de cristobalita, uma das formas cristalinas da sílica, além de um halo amorfo proeminente, passível de atividade pozolânica.

A reatividade do material também foi avaliada, de forma indireta, por meio do índice de atividade pozolânica (IAP), com cimento Portland ou cal hidratada, conforme preconizado pelas normas NBR 7.752 (2012) e NBR 5.751 (2012), respectivamente. A SCA utilizada nesse estudo apresentou uma resistência à compressão de 6,1 MPa no IAP com cal, ficando acima do limite mínimo de 6,0 MPa estabelecido pela NBR 12.653 (2012). No IAP com cimento Portland, a SCA apresentou uma resistência de 38,8 MPa, valor superior à 75% da

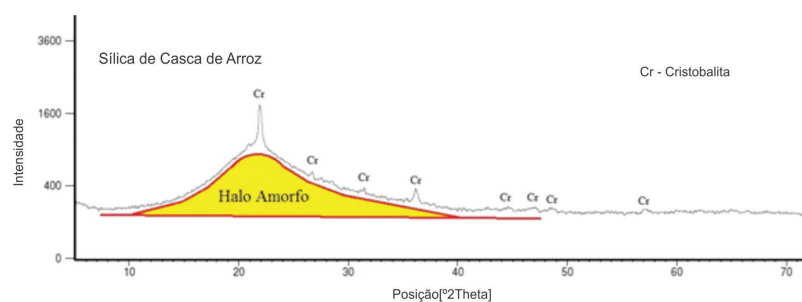


Figura 1: Difratograma da Sílica de Casca de Arroz.

Tabela 1: Análise química da Silica de Casca de Arroz.

ADIÇÃO MINERAL	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)								
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	DEMAIS ÓXIDOS	PERDA FOGO
Silica Casca Arroz	0,43	88,47	2,72	0,05	–	1,55	1,46	0,49 ¹	4,84

¹CuO, ZnO, MnO, P₂O₅, Tm₂O₃ e Rb₂O.

resistência obtida pela argamassa referência no ensaio (41,1 MPa), cumprindo, dessa forma, a resistência mínima preconizada pela NBR 12.653 (2012).

A reatividade da SCA também foi determinada de maneira direta, utilizando o ensaio Chapelle modificado, conforme a norma NBR 15895 (2010). A capacidade de fixar cal por atividade pozolânica resultou em 1336 mg de Ca(OH)₂/g SCA. Esse valor é superior ao limite mínimo de 436 mg de Ca(OH)₂/grama de adição mineral estabelecido por Raverdy *et al.* [20], classificando a SCA como uma pozolana de alta reatividade.

A análise química da SCA foi realizada por meio da técnica de espectrometria de fluorescência de raios X, que indicou um teor de dióxido de silício próximo a 88%, como apresentado na Tabela 1.

A caracterização física foi realizada pela determinação da massa específica (2,12 g/cm³) e pela área superficial específica BET (14,692 m²/g). A curva granulométrica da SCA resultante do ensaio de granulometria a laser, apresentada na Figura 2, evidenciou que a maior parcela das partículas que compõem a SCA apresenta dimensão inferior a 10 µm.

2.1.2. Cimento

O cimento utilizado foi do tipo CP V – ARI, devido à inexistência de adições minerais ativas incorporadas na sua composição, o que torna possível o controle do teor de material pozolânico no sistema. As características físicas e químicas do cimento utilizado estão apresentadas na Tabela 2, a partir de informações repassadas pelo fabricante.

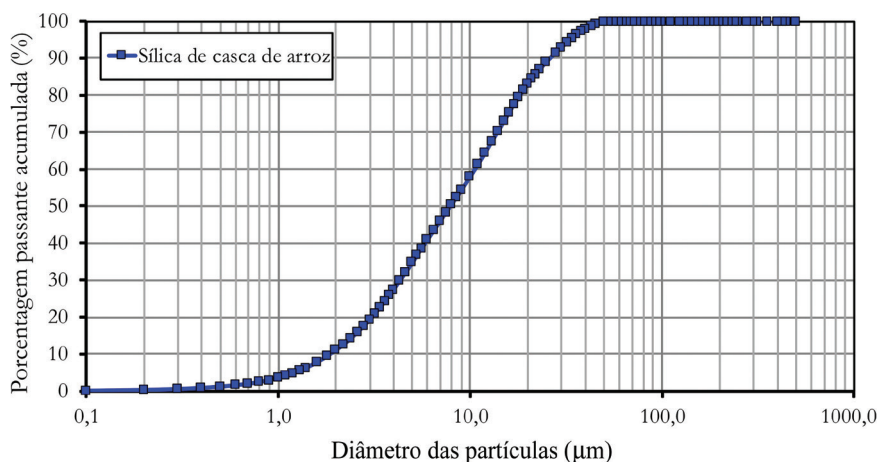


Figura 2: Distribuição granulométrica a laser da sílica de casca de arroz.

Tabela 2: Composição físico-química do cimento.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS										
FINURA			TEMPO DE PEGA		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)				EXIGÊNCIAS QUÍMICAS (%)	
BLAINE (cm ² /g)	#200 (%)	#325 (%)	INÍCIO (MIN)	FIM (MIN)	1 DIA	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	RESÍDUO INSOLÚVEL	PERDA AO FOGO
4505	0,07	0,40	198	244	24,40	40,00	46,90	54,80	0,78	3,42
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)										
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO LIVRE	EQUIVALENTE ALCALINO			
61,24	19,18	4,48	3,10	2,92	3,79	0,97	0,65			

2.1.3. Hidróxido de cálcio p.a.

O hidróxido de cálcio p.a. apresentou massa específica de 2,24 g/cm³ e peso molecular igual a 74,09. A caracterização química fornecida pelo fabricante é apresentada na Tabela 3.

2.2. Pastas

A substituição parcial do cimento Portland por SCA foi realizada em 3 teores, em massa: 5, 10 e 15%.

A incorporação do hidróxido de cálcio p.a. às misturas foi realizada em adição a massa de material aglomerante (cimento + SCA). Foram adotados 3 teores de incorporação de hidróxido de cálcio: 5, 10 e 15%.

A combinação entre os teores de SCA e CH resultou em 12 proporções diferentes, além de uma proporção de referência, composta apenas por cimento Portland. A nomenclatura das amostras foi realizada utilizando-se o teor de substituição de SCA seguido do teor de CH adicionado (SCAxCH).

A fim de reduzir a interferência de outras variáveis no sistema, a relação água/aglomerante (cimento + SCA) foi fixada em 0,5. A Tabela 4 apresenta a composição das misturas e a relação SCA/CH de cada proporção.

As amostras foram moldadas em recipientes cilíndricos, Ø2,5 × 4,0 cm. Após 48 horas, foram desmoldadas e submetidas à cura submersa em água saturada com cal até as idades de ensaio.

Tabela 3: Análise química do Hidróxido de Cálcio.

COMPONENTE	TEOR (%)
Ca(OH) ₂	95,300
CaCO ₃	< 3,000
Insolúveis em HCl	< 0,030
Cloreto (Cl)	< 0,030
Comp. Sulfurados (como SO ₄)	< 0,100
Metais Pesados (como chumbo)	< 0,003
Ferro (Fe)	< 0,050
Magnésio (Mg)	< 0,500
Potássio (K)	< 0,050
Sódio (Na)	< 0,050
Estrôncio (Sn)	< 0,050

Tabela 4: Composição das pastas e relação CH/SCA.

TRAÇO	CIMENTO (g)	SÍLICA DE CASCA DE ARROZ (g)	HIDRÓXIDO DE CÁLCIO (g)	ÁGUA (g)	RELAÇÃO ÁGUA/ (CIM+SCA)	CONSUMO DE CIMENTO (g/cm ³)	RELAÇÃO CH/SCA ADICIONADOS
Referência	476,79	0,00	0,00	238,40	0,50	1,21	0,00
5×0	448,92	23,63	0,00	236,27	0,50	1,14	0,00
5×5	437,18	23,01	23,01	230,09	0,50	1,11	1,00
5×10	426,03	22,42	44,85	224,23	0,50	1,08	2,00
5×15	415,44	21,87	65,60	218,65	0,50	1,06	3,00
10×0	421,54	46,84	0,00	234,19	0,50	1,07	0,00
10×5	410,60	45,62	22,81	228,11	0,50	1,05	0,50
10×10	400,23	44,47	44,47	222,35	0,50	1,02	1,00
10×15	390,36	43,37	65,06	216,87	0,50	0,99	1,50
15×0	394,63	69,64	0,00	232,14	0,50	1,00	0,00
15×5	384,49	67,85	22,62	226,17	0,50	0,98	0,33
15×10	374,85	66,15	44,10	220,50	0,50	0,95	0,67
15×15	365,68	64,53	64,53	215,11	0,50	0,93	1,00

Nas idades de 7, 14, 28, 91 e 182 dias foram executados os ensaios de porosidade aparente. As amostras foram retiradas da cura submersa, e nelas foram determinadas as respectivas massas saturada superfície seca (M_{sat}) e, em balança hidrostática, as massas submersas (M_i). Na sequência, as reações de hidratação foram paralisadas por meio da submersão das amostras em álcool etílico absoluto durante 48 horas. Após este período de tempo, as amostras foram retiradas do álcool e estocadas em estufa a 40 °C até a constância de massa. Por fim, as respectivas massas secas (M_s) foram determinadas. Este procedimento seguiu a recomendação estudada e validada no trabalho de Hoppe Filho *et al.* (2021) [27].

Os ensaios de porosidade aparente foram realizados em quadruplicadas em cada idade analisada. As porosidades aparentes das pastas foram obtidas por meio da Equação 1:

$$P = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad (1)$$

A análise térmica (TG/DTG) foi utilizada para quantificar o teor de hidratos formados e determinar o teor de hidróxido de cálcio remanescente das amostras na idade de 91 dias. O preparo das amostras consistiu em paralisar as reações de hidratação conforme metodologia relatada anteriormente. Após a secagem em estufa, as amostras foram colocadas em recipientes vedados e acondicionadas em dessecador com sílica gel até a realização dos ensaios.

O equipamento utilizado nas análises é da marca Shimadzu, modelo DTG-60. No momento do ensaio, foi retirado de cada uma das amostras um fragmento de pasta, que foi moído em almofariz de porcelana até obtenção de um material pulverulento com partículas inferiores a 75 µm. Uma porção de 10 miligramas de amostra foi acondicionada em cadinho de platina para, na sequência, ser submetida a temperaturas entre 35 °C e 1000 °C, em atmosfera de nitrogênio (50 mL/min.), com taxa de aquecimento de 10 °C/min.

2.3. Concreto

Utilizando as mesmas combinações de SCA e CH das pastas, foram moldadas amostras de concreto com dimensão 4×4×16 cm. Foi utilizada uma proporção de mistura (em massa) de 1,00:2,25:3,00 (cimento:a-reia:brita). A Figura 3 apresenta a distribuição granulométrica dos agregados utilizados. Como agregado miúdo foi utilizado a areia natural, com módulo de finura igual a 2,66, enquanto a brita utilizada como agregado graúdo apresentou uma dimensão máxima característica de 12,5 mm.

A relação água/aglomerante permaneceu fixa em 0,5. Para manter a fluidez constante em 10 ± 2 cm, foi utilizado o aditivo superplastificante PowerFlow 3100.

Uma vez que todas as substituições foram realizadas em massa, a incorporação de SCA e hidróxido de cálcio na mistura provocaram alterações no volume final da mistura e, conseqüentemente, no consumo de cimento. A Tabela 5 apresenta o consumo de materiais para cada proporção avaliada.

Após desformadas, as amostras permaneceram em cura submersa em água saturada com cal até as datas de ensaio. Foram realizados ensaios de compressão aos 28 e 91 dias, utilizando uma prensa universal, modelo EMIC DL 30000.

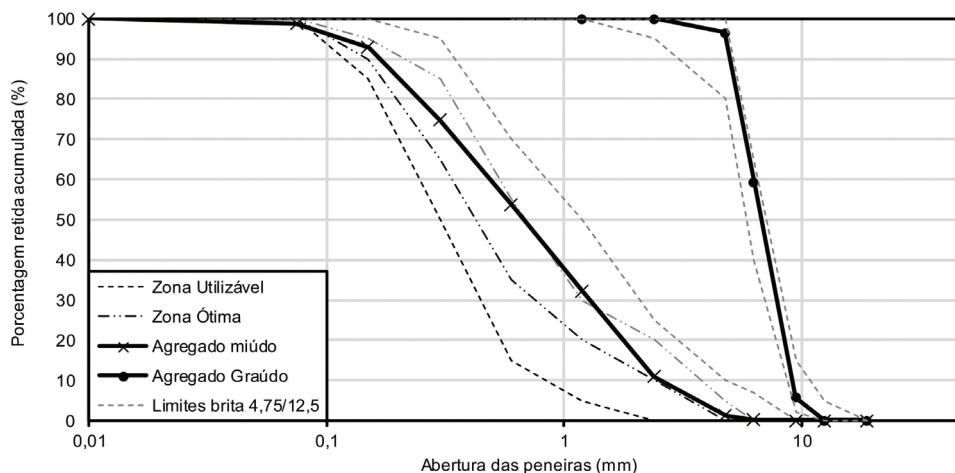


Figura 3: Distribuição granulométrica dos agregados.

Tabela 5: Composição das pastas e relação CH/SCA.

PROPORÇÃO	CONSUMO (kg/m ³)					ADITIVO (%)	SLUMP TEST (cm)
	CIMENTO	AREIA	BRITA	SÍLICA DE CASCA DE ARROZ	HIDRÓXIDO DE CÁLCIO P.A.		
Referência	349,00	786,00	1048,00	0,00	0,00	0,90	8,0
5 × 0	331,00	784,00	1045,00	17,00	0,00	0,76	12,0
5 × 5	328,00	778,00	1037,00	17,00	17,00	0,80	9,0
5 × 10	326,00	772,00	1029,00	17,00	34,00	0,80	8,7
5 × 15	323,00	766,00	1021,00	17,00	51,00	0,95	9,0
10 × 0	313,00	782,00	1042,00	35,00	0,00	0,85	9,0
10 × 5	310,00	776,00	1034,00	34,00	17,00	0,80	8,5
10 × 10	308,00	770,00	1026,00	34,00	34,00	0,70	8,5
10 × 15	306,00	764,00	1018,00	34,00	51,00	0,85	9,1
15 × 0	295,00	780,00	1039,00	52,00	0,00	0,80	8,5
15 × 5	292,00	774,00	1031,00	52,00	17,00	0,60	9,0
15 × 10	290,00	768,00	1024,00	51,00	34,00	0,70	8,6
15 × 15	288,00	762,00	1016,00	51,00	51,00	0,80	9,5

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Porosidade aparente

A porosidade inicial das pastas foi obtida de forma teórica, podendo ser entendida como o volume de água de amassamento em relação ao volume total do sistema, composto pelas partículas sólidas e pela água. A porosidade nas demais idades foi obtida experimentalmente, e estão apresentadas na Figura 4.

A Figura 4a retrata a porosidade inicial teórica das amostras, evidenciando a redução da porosidade inicial de todas as pastas se comparadas à amostra de referência. Essa redução ocorre devido à substituição parcial do cimento por sílica de casca de arroz, que possui massa específica inferior.

Dessa forma, a substituição em massa do cimento por SCA em cada proporção implica em maior volume ocupado por SCA para a mesma massa de cimento. A redução da porosidade teórica inicial é ainda intensificada em proporções com a presença de hidróxido de cálcio. Esse fenômeno decorre do aumento de partículas sólidas na composição das misturas, uma vez que o hidróxido de cálcio foi utilizado em adição ao material aglomerante. Portanto, quanto maior o teor de hidróxido de cálcio adicionado aos sistemas cimentícios, menor a porosidade inicial teórica.

Ao avaliar a porosidade das amostras em uma determinada idade, observa-se que a presença de SCA não reduz a porosidade dos sistemas a níveis inferiores aos determinados na referência. De fato, o aumento do teor de SCA incorporado resultou no aumento da porosidade quando comparado com a amostra de referência em todas as idades analisadas.

Esse fenômeno decorre de uma característica intrínseca da hidratação do cimento, em que os compostos formados após a hidratação do cimento passam a ocupar maior volume que ocupava o grão de cimento anidro [6]. A SCA, por sua vez, não apresenta essa característica, de forma que, quando reage com o CH, forma compostos com volumes próximos ao volume inicial dos materiais anidros [10].

Porém, ainda que a alteração da porosidade ocorra essencialmente devido às reações de hidratação do cimento, a variação do teor de cimento não implicou, necessariamente, em uma variação proporcional da porosidade. Esse fenômeno pode ser explicado devido à interferência na cinética e no grau de hidratação do cimento causada pela presença de SCA e do CH.

Sabe-se que as partículas de SCA atuam como ponto de nucleação, dispersando os grãos de cimento anidro, o que favorece o aumento do grau de hidratação. Além disso, as partículas de SCA também são capazes de absorver água e liberá-las tardiamente, o que possibilita a hidratação dos grãos anidros do cimento por tempos mais longos [17].

Desse modo, a reação pozolânica da SCA, por si só, pouco altera o volume de poros. A interferência da SCA na porosidade do sistema ocorre de modo indireto, a partir da alteração da quantidade de cimento na mistura e do grau de hidratação.

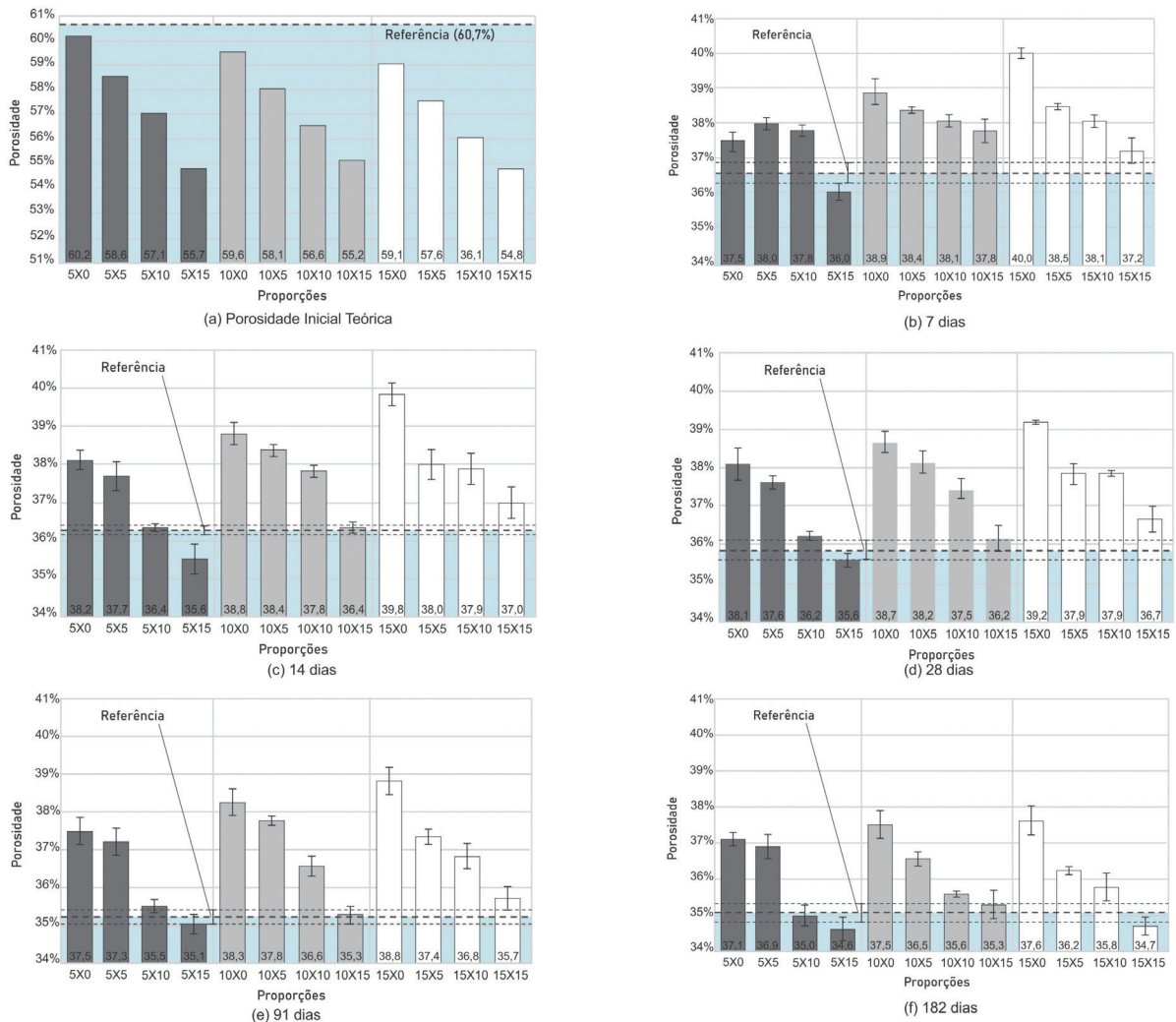


Figura 4: Porosidade inicial teórica das amostras (a) e experimental aos 7 dias (b), 14 dias (c), 28 dias (d), 91 dias (e) e 182 dias (f).

Ao avaliar a evolução da porosidade das amostras ao longo do tempo, verifica-se que uma redução substancial de porosidade ocorre já nos primeiros 7 dias, causada pela rápida hidratação dos grãos de cimento. A partir dos 28 dias, a amostra de referência não apresenta reduções significativas na porosidade, indicando que as reações de hidratação, em sua maioria, já ocorreram.

Observando as amostras com SCA sem incorporação de CH aos 182 dias, idade em que as reações pozolânicas já estão em estágio mais avançado, fica evidente o aumento da porosidade em relação à amostra de referência.

Desse modo, os volumes totais de poros dos sistemas são efeito conjugado da quantidade de cimento passível de ser hidratado e do grau de hidratação do material.

Ao observar o comportamento das amostras sob a perspectiva do teor de hidróxido de cálcio, nota-se que, para um teor de SCA fixo, ocorre uma tendência de redução da porosidade com o aumento do teor de hidróxido de cálcio adicionado. De fato, esse comportamento era esperado, haja vista o aumento das fases sólidas que compõem esses sistemas, ou seja, aumento da concentração de sólidos já no momento da mistura das pastas.

Não obstante, a presença do hidróxido de cálcio também altera a cinética das reações de hidratação dos sistemas, seja pelo efeito físico de nucleação, seja pelo efeito químico causado pela saturação do meio com íons cálcio [28].

Ao analisar a idade de 182 dias, observa-se que a pasta com a incorporação de 5% de SCA tem sua porosidade reestabelecida ao nível observado na referência quando as adições de CH são igual ou superior a 10%, enquanto os teores de 10 e 15% de SCA precisam de 15% de CH para ter uma porosidade equiparável à amostra de referência.

Isso indica que a eventual melhoria no grau de hidratação do cimento causada pela presença de SCA não foi o suficiente para reestabelecer o volume de poros. De fato, foi necessário o aumento de material sólido para compensar o aumento da porosidade causado pela redução de cimento.

Em suma, a substituição parcial do cimento Portland por SCA resulta em aumento da porosidade aparente ao longo do tempo, independentemente do teor utilizado. Quanto maior o teor de SCA na composição, maior a porosidade aparente da pasta. Portanto, apesar das vantagens advindas da atividade pozolânica, o aumento da porosidade aparente pode ser um fator preponderante para a redução da durabilidade das composições contendo SCA frente a determinados agentes agressivos, sobretudo à ação do anidrido carbônico, amplamente relatado na literatura [10,22,28].

3.2. Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica permite quantificar os hidratos e os carbonatos a partir da perda de massa quando submetidos a determinadas faixas de temperatura.

A perda de massa na faixa de temperatura entre 35 °C e ≈ 400 °C está associada à água quimicamente combinada (AQC) na forma de C-S-H e fases aluminato hidratadas – AFt e AFm.

A perda de massa ocorrida no intervalo entre as temperaturas de ≈ 400 °C e ≈ 480 °C está relacionada à água de composição do hidróxido de cálcio (CH) que, ao ser multiplicado pela constante 4,11, oriunda da razão entre a massa molecular do hidróxido de cálcio (74,09) e a massa molecular da água (18,01), fornece o teor de hidróxido de cálcio contido na amostra.

A perda de massa referente a faixa de temperatura entre ≈ 480 °C e 1000 °C está relacionada ao teor de dióxido de carbono (CO_2) que, ao ser multiplicado pela constante 2,27, advinda da razão entre a massa molecular do carbonato de cálcio (100,09) e a massa molecular do dióxido de carbono (44,00), fornece o teor de carbonato de cálcio (CaCO_3) presente na amostra. O teor de CaCO_3 da amostra é variável em virtude do teor de fíler presente na composição do cimento e da carbonatação que pode ocorrer durante o preparo das amostras.

A Tabela 6 apresenta os teores encontrados em cada faixa de temperatura analisada nas curvas TG/DTG das amostras. As perdas de massa obtidas nas diferentes faixas de temperatura foram corrigidas para a mesma base de não voláteis, a fim de permitir a análise comparativa entre as diferentes composições. Esse procedimento já foi observado em pesquisas anteriores [2,29].

A Tabela 6 apresenta os resultados da análise termogravimétrica das pastas estudadas na mesma base de não voláteis.

Após a correção dos resultados da análise termogravimétrica, também se fez necessário corrigir para a base de não voláteis a proporcionalidade entre os teores de cimento utilizados nas amostras com materiais alternativos (SCA e CH) em relação ao teor de cimento contido na amostra de referência. O conhecimento dessa

Tabela 6: Análise termogravimétrica das pastas avaliadas aos 91 dias de idade.

PROPORÇÃO	AQC (%)	HIDRÓXIDO DE CÁLCIO (%)		CARBONATO DE CÁLCIO (%)	
	C-S-H + ALUMINATOS	ÁGUA	CH	CO_2	CaCO_3
REF	19,40	19,40	23,21	9,70	22,02
5×0	18,93	18,93	20,32	8,67	19,68
5×5	18,21	18,21	25,56	7,62	17,30
5×10	18,06	18,06	27,04	7,20	16,34
5×15	17,56	17,56	31,27	7,83	17,78
10×0	19,67	19,67	18,44	7,78	17,67
10×5	18,22	18,22	20,67	8,75	19,87
10×10	17,93	17,93	23,51	8,75	19,87
10×15	17,56	17,56	24,61	8,66	19,66
15×0	18,61	18,61	16,19	7,02	15,94
15×5	18,89	18,89	17,61	10,30	23,39
15×10	17,53	17,53	18,99	9,14	20,74
15×15	17,58	17,58	23,67	7,83	17,78

proporcionalidade permite estimar as parcelas de água quimicamente combinada e de hidróxido de cálcio oriundas da hidratação do cimento a partir da extrapolação dos dados.

A correção do teor de cimento para a mesma base de não voláteis foi determinada pela Equação 2, que expressa a razão entre o teor de cimento presente na amostra e a fração não volátil total do sistema. A fração não volátil do sistema é dada pela soma do cimento e da SCA, que totalizam os 100%. Como o CH foi incorporado em adição à massa dos materiais aglomerantes (cimento + SCA), a segunda parcela do denominador corresponde à essa adição. Por fim, constante 0,757 é a fração não volátil do hidróxido de cálcio, dado pela razão entre a massa molecular do óxido de cálcio (56) e a massa molecular do hidróxido de cálcio (74).

$$Teor\ cim.\ corr(\%) = \frac{Teor\ cimento\ (\%)}{100 + teor\ CH\ (\%) \cdot 0,757} \tag{2}$$

Desse modo, o teor teórico de AQC referente à hidratação do cimento nas amostras foi determinado pelo produto entre o teor de cimento corrigido e o teor de AQC obtido experimentalmente para a amostra de referência.

A Figura 5 apresenta um comparativo entre o teor de água quimicamente combinada teórica e experimental das amostras.

Ao observar a Figura 5, verifica-se uma tendência de redução do teor teórico de AQC a medida que a incorporação de SCA e CH é aumentada. Essa redução ocorre devido ao menor consumo de cimento desses sistemas. Com efeito, para um mesmo grau de hidratação, quanto menor a quantidade de cimento passível de ser hidratado, menor será a quantidade de compostos hidratados formados.

As análises experimentais dos teores de AQC das amostras apresentaram-se invariavelmente superiores aos teores teóricos. Essa diferença entre o teor experimental e o teor teórico de AQC pode ser compreendida a partir de reações químicas distintas: a alteração na cinética de hidratação do cimento e o desenvolvimento de reações pozolânicas.

Contudo, ainda que a incorporação de SCA tenha provocado reações capazes de amenizar a redução do teor de AQC causado pela baixa no consumo de cimento dos sistemas, esses efeitos não foram capazes de reestabelecer o teor de AQC apresentado pela amostra de referência, com exceção da mistura com proporção 10 × 0.

Em se tratando do estudo de CH presente nas amostras, é importante compreender que o teor de CH dos sistemas está atrelado ao consumo de cimento e ao teor de incorporação de hidróxido de cálcio p.a. Dessa forma, o teor de CH total da mistura pode ser melhor entendido ao comparar 3 situações distintas: o teor experimental de CH do sistema, o teor teórico de CH oriundo da hidratação do cimento, e o teor teórico de CH após a adição de hidróxido de cálcio, conforme apresentado na Tabela 7.

A primeira abordagem (terceira coluna da Tabela 7) se difere das demais devido seu caráter experimental, representando o teor de CH que há, de fato, na mistura aos 91 dias de idade. Os teores dessa abordagem são resultantes das análises termogravimétricas das amostras, obtido a partir das curvas de TG/DTG.

A partir do resultado da amostra referência apresentado na abordagem experimental é possível realizar a extrapolação de dados e obter os teores teóricos das demais amostras, utilizando a proporcionalidade do teor

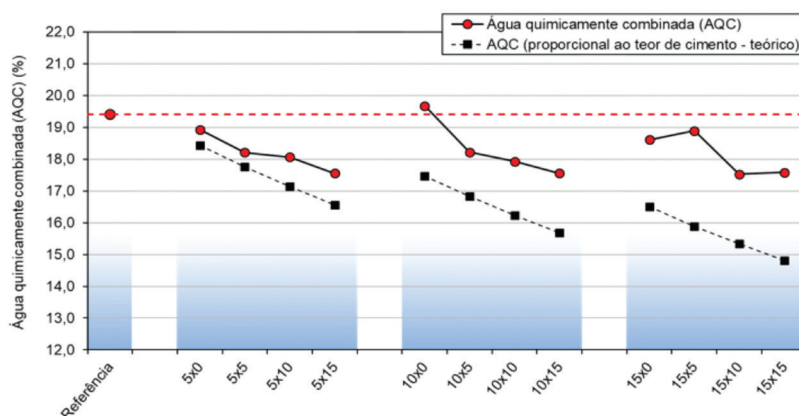


Figura 5: Teor de água quimicamente combinada teórico e experimental das amostras aos 91 dias de idade.

Tabela 7: Teores de CH teóricos e experimentais para a idade de 91 dias.

PROPORÇÃO	TEOR DE CIMENTO CORRIGIDO (%)	TEOR DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO (%)		
		EXPERIMENTAL	TEÓRICO (CIMENTO)	TEÓRICO (CIMENTO + ADIÇÃO DE CH)
Referência	100,00	23,21	23,21	23,21
5×0	95,00	20,32	22,05	22,05
5×5	91,54	25,56	21,24	26,06
5×10	88,32	27,04	20,49	29,79
5×15	85,32	31,27	19,80	33,27
10×0	90,00	18,44	20,89	20,89
10×5	86,72	20,67	20,12	24,94
10×10	83,67	23,51	19,42	28,71
10×15	80,83	24,61	18,76	32,23
15×0	85,00	16,19	19,72	19,72
15×5	81,90	17,61	19,01	23,82
15×10	79,02	18,99	18,34	27,63
15×15	76,33	23,67	17,71	31,18

de cimento corrigido para a mesma base de não voláteis. Dessa forma, obtém-se, na segunda abordagem, o teor teórico de CH oriundo exclusivamente de reações de hidratação do cimento. Convém salientar que esta metodologia exclui qualquer influência decorrente da presença de SCA sobre a hidratação do cimento.

O procedimento utilizado para a determinação do teor de CH decorrente da hidratação do cimento é análogo ao realizado na determinação de AQC teórico já comentado anteriormente.

Por fim, a terceira abordagem também se refere a um teor teórico de CH. Nesse cenário é considerado o montante total de CH presente nas amostras após a adição de hidróxido de cálcio p.a. Essa parcela foi determinada pela soma do teor de CH teórico oriundo da hidratação do cimento com o teor de CH incorporado à mistura, já corrigido para a base de não voláteis.

Dessa forma, os diferentes teores de CH foram confrontados. A Figura 6 apresenta os teores teóricos e os teores experimentais de cada uma das amostras.

Nota-se que a redução do teor de CH oriundo da hidratação do cimento é esperada devido à redução do consumo do material na composição das amostras contendo SCA. Contudo, na teoria, observa-se que a adição de 5% de CH seria capaz de reestabelecer a reserva alcalina dos sistemas para todos os teores de SCA avaliados, o que não ocorreu.

Ao analisar os dados experimentais, verifica-se que apenas o sistema com menor teor de SCA (5%) foi capaz de reestabelecer o teor de portlandita com a adição de 5% de CH aos 91 dias. De fato, os dados experi-

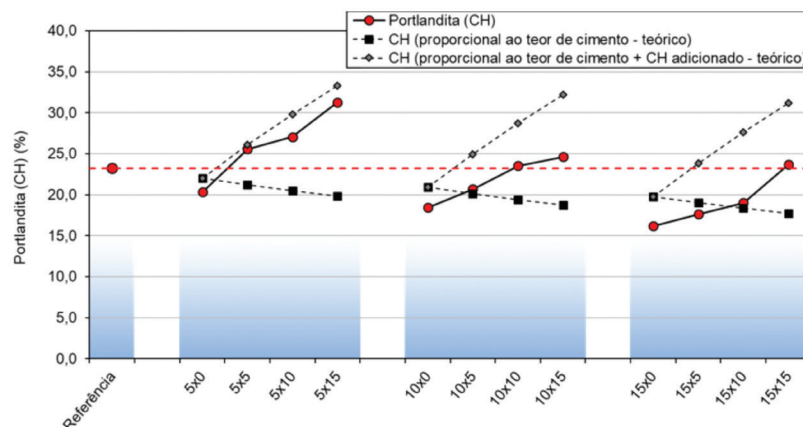


Figura 6: Teor de hidróxido de cálcio teórico e experimental das amostras aos 91 dias.

mentais sugerem que, para faixa de incorporação de SCA estudada, o teor de hidróxido de cálcio do sistema é reestabelecido quando o uso de CH e SCA ocorrem em igualdade de teor.

As amostras apresentaram um teor de CH menor que aquele teórico considerando a proporcionalidade de cimento e a adição de CH, o que indica a ocorrência de reações pozolânicas.

Ao adotar a simplificação de igualdade do grau de hidratação em todos os sistemas, torna-se viável estimar o teor de hidróxido de cálcio consumido por atividade pozolânica em cada proporção a partir da diferença entre as linhas do teor teórico total de CH (cimento + CH) e o teor experimental, apresentadas na Figura 6.

Observa-se que os consumos totais de CH nas proporções com menor teor de SCA (5%) se mostram inferiores aos consumos totais de CH apresentados pelas séries com 10 e 15% de SCA.

O consumo de CH aparenta ser intensificado a medida que ocorre o aumento do teor de SCA na mistura, ficando evidente visualmente pelo afastamento entre as linhas do teor teórico total e o teor experimental.

Essa diferença mais expressiva nos teores com 10 e 15% de SCA deve-se a maior disponibilidade de material passível de reação.

Contudo, uma análise comparativa em termos de reatividade da SCA em cada condição não pode ser extraída diretamente da Figura 6. Isso se deve à variação da quantidade de material reativo em cada amostra, que altera a percepção da capacidade da SCA em fixar CH.

Desse modo, a capacidade de fixação de hidróxido de cálcio da SCA nos diferentes sistemas foi estimada a partir da razão dada entre o consumo total de CH e o teor de SCA adicionado, fornecendo o consumo aparente de CH por grama de adição, conforme apresentado na Figura 7.

O comportamento apresentado na Figura 7 indica que o consumo aparente de CH não é proporcional ao aumento da quantidade de material com potencial reativo. Na realidade, à medida que o teor incorporado ultrapassa o teor de 10%, o consumo aparente sofreu redução. Desse modo, a Figura 7 apresenta um ponto de consumo máximo quando há incorporação de SCA no teor de 10%.

Um ponto a ser destacado é o consumo de CH das amostras com 10% de SCA, que se mostraram mais sensíveis à variação da disponibilidade alcalina do meio. De fato, ao aumentar a disponibilidade alcalina desse sistema, o consumo de CH passou do menor valor dentre as amostras (288,07 mg/g de SCA - proporção 10×0) para a maior fixação de CH dentre as amostras (818,15 mg/g de SCA - proporção 10×15).

Observa-se também que a efetividade da reposição da reserva alcalina dos sistemas foi afetada devido ao aumento da capacidade da SCA em fixar CH, de modo que, dentro de um mesmo teor de SCA, quanto maior foi a tentativa de reposição, maior foi a capacidade de fixação de CH apresentado pela SCA.

Desse modo, o aumento do consumo de CH deve ser atrelado ao desenvolvimento de potencial reativo do material pozolânico. Contudo, este fato deve ser analisado com cautela, uma vez que o aumento do potencial reativo não implica no aumento da quantidade de produtos hidratados no sistema. Essa condição é verificada na proporção 10×0, que se mostrou a única proporção equiparável à amostra de referência (Figura 5), porém apresentou o menor consumo de CH aparente (Figura 7).

3.3. Resistência à compressão

Os resultados obtidos no ensaio à compressão aos 28 dias foram reunidos na Figura 8. As amostras contendo SCA apresentaram uma tendência de redução da resistência à compressão, com exceção às proporções 5×0, 5×5 e 15×0, que apresentaram resistências estatisticamente iguais à amostra referência ao serem submetidas ao teste de Tukey.

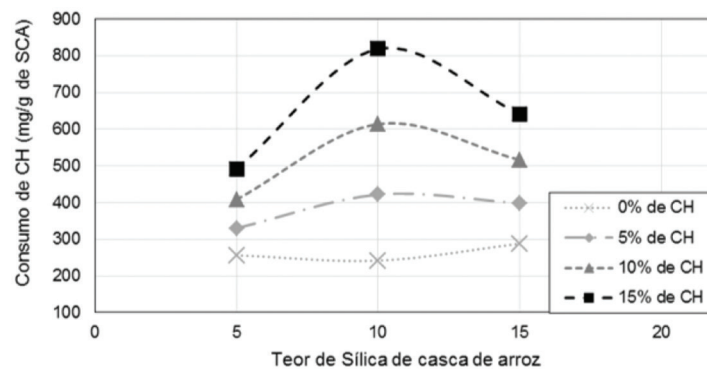


Figura 7: Consumo de hidróxido de cálcio por atividade pozolânica das amostras aos 91 dias.

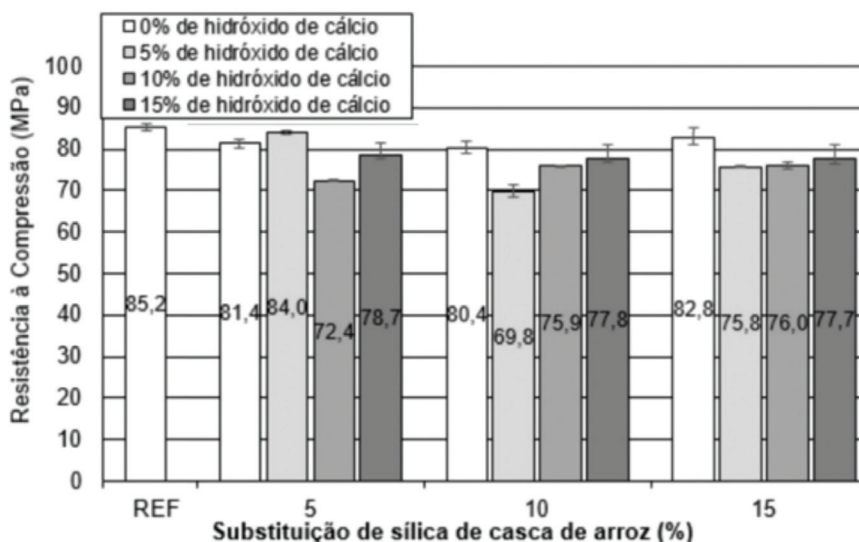


Figura 8: Resistência à compressão das amostras de concreto aos 28 dias.

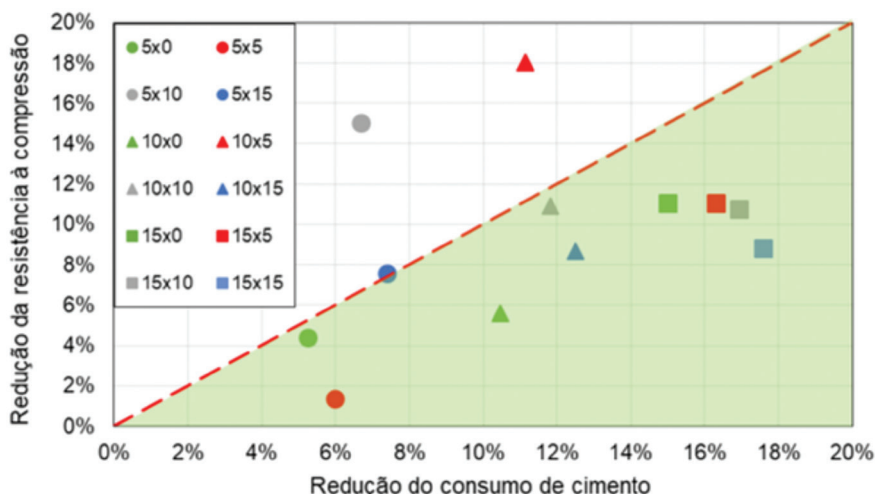


Figura 9: Relação entre a redução do consumo de cimento e a redução de resistência à compressão aos 28 dias

Essa queda na resistência à compressão pode ser explicada pela redução do consumo de cimento das amostras, o que indica que dentre todas as alterações no sistema causadas pela SCA - seja a ação pozolânica, o efeito filer, ou a nucleação do cimento – a redução da quantidade de cimento foi o fator preponderante na determinação da resistência aos 28 dias.

De fato, excluindo-se a amostra referência, as proporções 5 × 0 e 5 × 5 apresentam os maiores consumos de cimento, o que explica os bons desempenhos apresentados. Contudo, a amostra 15 × 0 tem um dos menores consumos de cimento e, ainda assim, manteve a resistência à compressão, evidenciando que a melhoria do sistema teve grande influência na resposta dessa amostra.

A Figura 9 apresenta o comportamento das amostras ao relacionar a redução da resistência à compressão com a redução do consumo de cimento em função dos valores da amostra referência.

A Figura 9 evidencia que, em geral, as amostras apresentaram uma redução percentual da resistência à compressão inferior à redução percentual do consumo de cimento, exceto em 2 situações específicas. Isso indica que a atividade pozolânica da SCA é capaz de reestabelecer parcialmente a redução da resistência à compressão decorrente da substituição parcial do cimento Portland.

A Figura 10 apresenta as resistências das amostras aos 91 dias. Ao serem analisadas estatisticamente, somente as proporções 5 × 10 e 10 × 5 apresentaram resistências à compressão inferiores à amostra referência.

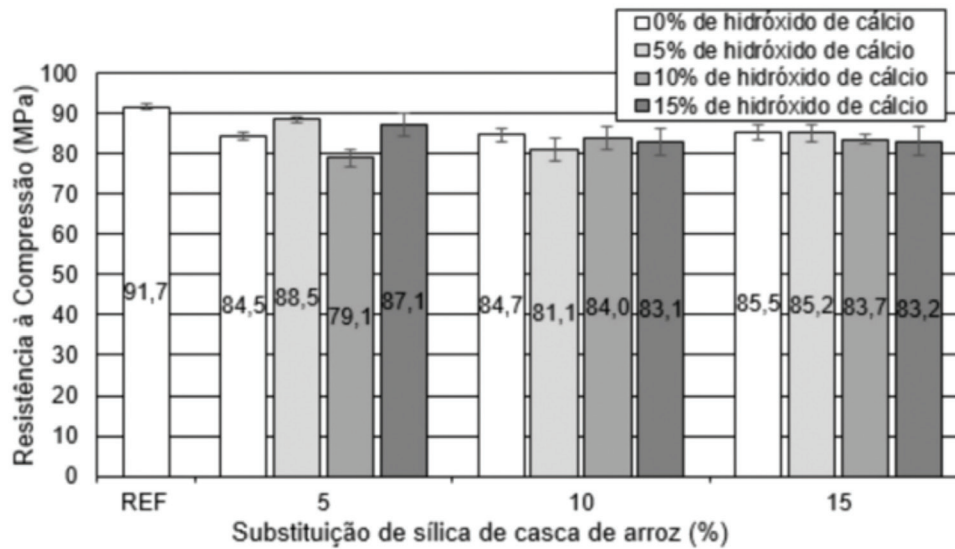


Figura 10: Resistência à compressão das amostras de concreto aos 91 dias.

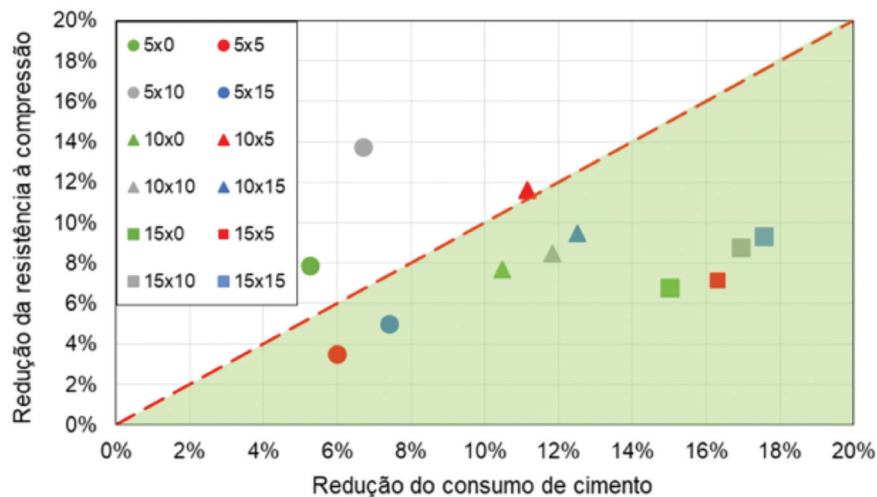


Figura 11: Relação entre a redução do consumo de cimento e a redução de resistência à compressão aos 91 dias.

O aumento da resistência tardio apresentado pelas amostras com SCA e hidróxido de cálcio reforça que a presença desses materiais altera a cinética das reações químicas. Esse aumento da resistência pode ter ocorrido em virtude de um prolongamento no tempo de hidratação do cimento ou devido às reações pozolânicas.

A Figura 11 apresenta o comparativo entre a redução da resistência à compressão e a redução do consumo de cimento das amostras em função dos valores da amostra referência aos 91 dias.

A Figura 11 evidencia que os únicos traços que apresentaram uma redução na resistência à compressão superior à redução de consumo do cimento pertencem à série com 5% de SCA. Isso indica que as atividades pozolânicas das demais proporções foram capazes de compensar, parcialmente, as reduções no consumo de cimento.

Ao comparar a Figura 11 com a Figura 9, nota-se um aumento do distanciamento da série com 15% de SCA em relação à linha tracejada. Isso indica que o avanço da idade foi ainda mais benéfico para as proporções com maior teor de substituição do cimento por SCA.

Dentre as amostras estudadas, a proporção 15×15 merece destaque, visto que teve uma economia de 17% no consumo de cimento e, ainda assim, apresentou uma resistência à compressão equiparável estatisticamente à amostra referência.

3.4. Análise sistêmica

A análise sistêmica, aos 91 dias, referente à água quimicamente combinada (AQC), portlandita remanescente e porosidade aparente é apresentada de forma relativa em comparação com a série de referência na Figura 12.

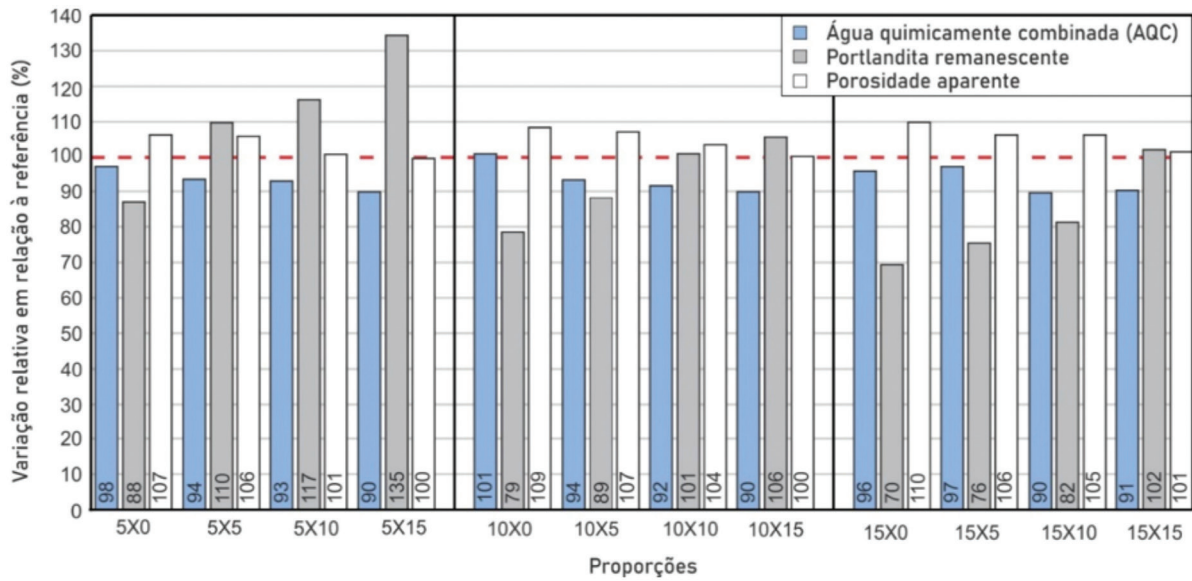


Figura 12: Variação relativa do teor de água quimicamente combinada, portlandita remanescente e porosidade aparente das pastas contendo SCA e CH em relação à pasta de referência, aos 91 dias de idade.

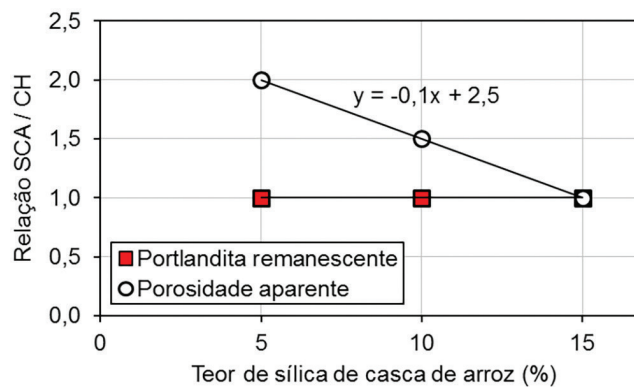


Figura 13: Relação SCA/CH para equiparar o teor de portlandita remanescente e a porosidade aparente das pastas contendo SCA aos respectivos valores observados na pasta de referência.

Os resultados relativos de água quimicamente combinada demonstram que há redução no teor de hidratos formados quando da substituição parcial do cimento Portland por SCA. Exceção foi observada na composição 10x0, onde houve equiparação dos valores. A adição de CH para restabelecer o teor remanescente de portlandita nas pastas contendo SCA causou redução progressiva no teor de hidratos formados, ou seja, o maior teor de CH adicionado para repor a portlandita implica em redução mais significativa no teor de hidratos formados. Portanto, apesar da alta reatividade da SCA, não se observou o restabelecimento do teor de hidratos formados quando da substituição parcial do cimento Portland por SCA, independentemente do teor utilizado e do teor de CH adicionado.

O teor de portlandita remanescente nas pastas contendo SCA pode ser restabelecido ao teor observado na pasta de referência quando o teor de substituição parcial do cimento for igual ao teor de CH adicionado. A equiparação da porosidade aparente das pastas contendo SCA com a pasta de referência somente é obtida pela adição de CH. Sem a adição de CH, a porosidade aparente foi sempre maior que a observada na pasta de referência, independentemente do teor de SCA utilizado.

O restabelecimento da porosidade aparente das pastas contendo SCA requer o cumprimento mínimo da relação SCA/CH apresentada na Figura 13. É possível observar que o restabelecimento do teor de portlandita se mantém constante e unitário para a relação SCA/CH. Por outro lado, a porosidade aparente apresentou comportamento distinto, ou seja, é preciso variar a relação SCA/CH para restabelecer a porosidade das pastas contendo SCA ao nível observado na referência a depender do teor de SCA utilizado. Portanto, o restabelecimento do teor remanescente de portlandita e da porosidade aparente das pastas contendo SCA em relação à pasta de referência requer o cumprimento da relação apresentada para a porosidade aparente na Figura 13.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados nas amostras com diferentes teores de incorporação de SCA e CH, tem-se que:

- A utilização de SCA em substituição parcial ao cimento Portland provocou o aumento da porosidade desses sistemas devido à redução do consumo de cimento.
- A partir dos 91 dias, todas as proporções com 15% de CH apresentaram porosidade estatisticamente igual à amostra de referência, independentemente do teor de SCA.
- A proporção 10×0 foi a única mistura capaz de manter o teor de água quimicamente combinada apresentada pela amostra de referência. Isso indica que, para essa amostra, a redução de AQC causada pela redução do consumo de cimento foi equilibrada pela alteração na cinética de hidratação do cimento e pela atividade pozolânica.
- A adição de CH foi efetiva para reestabelecer a reserva alcalina quando utilizada em igualdade de teor à SCA.
- A reposição de reserva alcalina dos sistemas foi dificultada pelo aumento da capacidade da SCA em fixar CH em função da maior disponibilidade de portlandita no sistema. Para um teor fixo de SCA, quanto maior foi a disponibilidade de CH no meio, mais reativa a pozolana se mostrou.
- O teor de substituição de 10% de SCA se mostrou o mais sensível à incorporação de CH, apresentando a proporção com menor capacidade de fixar CH (proporção 10×0) e a proporção de maior reatividade (proporção 10×15).
- A proporção 10x15 se mostrou a mais eficiente na exploração do potencial reativo do material, apresentando o maior consumo de CH por unidade de SCA. Além disso, foi capaz de manter a reserva alcalina e a porosidade do sistema, sendo a proporção mais vantajosa dentro dos aspectos avaliados nesse estudo.
- A presença de SCA e CH nas misturas retardou o aumento de resistência à compressão. Porém, em geral, não houve redução da resistência à compressão em idades mais avançadas, como a de 91 dias testada neste artigo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, a Capes, a Agência Nacional de Águas (ANA) e a Fundação Araucária pelo apoio para aquisição dos equipamentos para esta pesquisa. Também agradecemos ao apoio institucional do Centro de Estudos em Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná (CESEC-UFPR) e a Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB).

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ZAIN, M.F.M, ISLAM, M.N., MAHMUD, F., *et al.*, “Production of rice husk ash for use in concrete as a supplementary cementitious material”, *Construction and Building Materials*, v. 25, pp.798-805, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.003>
- [2] HOPPE FILHO, J., GARCEZ, M.R., GARCEZ, E.O., *et al.*, “Evaluation of residual rice husk ash reactivity”, *Australian Ceramic Society*, v. 53, n. 2, pp. 917-924, 2017.
- [3] TORRES-CARRASCO, M., REINOSA, J.J., DE LA RUBIA, M.A., *et al.*, “Critical aspects in the handling of reactive silica in cementitious materials: Effectiveness of rice husk ash vs nano-silica in mortar dosage”, *Construction and Building Materials*, v. 223, pp. 360-367, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.023>
- [4] HU, L., HE, Z., ZHANG, S., “Sustainable use of rice husk ash in cement-based materials: Environmental evaluation and performance improvement”, *Journal of Cleaner Production*, v. 264, 121744, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121744>
- [5] VIEIRA, A.P., TOLEDO FILHO, R.D., TAVARES, L.M., *et al.*, “Effect of particle size, porous structure and content of rice husk ash on the hydration process and compressive strength evolution of concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 236, 117553, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117553>
- [6] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P. *Concrete: microstructure, properties and materials*. 3 ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [7] RAYMENT, D.L., MAJUDAR, A.J., “The composition of the C-S-H phases in Portland cement pastes”, *Cement and Concrete Research*, v. 12, pp. 753-764, 1982. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(82\)90039-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(82)90039-4)
- [8] HUANG, L., YANG, Z., “Hydration kinetics of tricalcium silicate with the presence of portlandite and calcium silicate hydrate”, *Thermochimica Acta*, v. 681, 178398, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.178398>

- [9] MADDALENA, R., HALL, C., HAMILTON, A., “Effect of silica particle size on the formation of calcium silicate hydrate [C-S-H] using thermal analysis”, *Thermochimica Acta*, v. 672, pp. 142-149, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.09.003>
- [10] OJEDOKUN, O., MANGAT P., “Characterization and pore structure of rice husk ash cementitious material”, *Durability and Sustainability of Concrete Structures*, v. 326, pp. 97-106, 2018.
- [11] RÊGO, J.H.S., NEPOMUCENO, A.A., FIGUEIREDO, E.P., *et al.*, “Microstructure of cement pastes with residual rice husk ash of low amorphous silica content”, *Construction and Building Materials*, v. 80, pp. 56-68, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.059>
- [12] ADESINA, P.A., OLUTOGE, F.A., “Structural properties of sustainable concrete developed using rice husk ash and hydrated lime”, *Journal of Building Engineering*, v. 25, 100804, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100804>
- [13] PARK, K.B., KWON, S.J., WANG, X.Y., “Analysis of the effects of rice husk ash on the hydration of cementitious materials”, *Construction and Building Materials*, v. 105, pp. 196-205, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.086>
- [14] SAHOO, S., PARHI, P.K., PANDA, B.C., “Durability properties of concrete with silica fume and rice husk ash”, *Cleaner Engineering and Technology*, v. 2, 100067, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100067>
- [15] THOMAS, B.S., “Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, pp. 3913-3923, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.081>
- [16] XU, W., LO, Y.T., OUYANG, D., *et al.*, “Effect of rice husk ash fineness on porosity and hydration reaction of blended cement paste”, *Construction and Building Materials*, v. 89, pp. 90-101, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.030>
- [17] HE, Z., LI, L., DU, S., “Creep analysis of concrete containing rice husk ash”, *Cement and Concrete Composites*, v. 80, pp. 190-199, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.03.014>
- [18] SHATAT, M., “Hydration behavior and mechanical properties of blended cement containing various amounts of rice husk ash in presence of metakaolin”, *Arabian Journal of Chemistry*, v. 9, pp. 1869-1874, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.12.006>
- [19] DE LARRARD, F., *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*. London: E&FN Spon, 1999.
- [20] HELENE, P.R.L., *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- [21] CUI, D., BANTHIA, N., WANG, Q., *et al.*, “Investigation on porosity of partly carbonated paste specimens blended with fly ash through dual CT scans”, *Construction and Building Materials*, v. 196, pp. 692-702, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.156>
- [22] ANTIOHOS, S.K., TAPALI, J.G., ZERVAKI, M., *et al.*, “Low embodied energy cement containing untreated RHA: A strength development and durability”, *Construction and Building Materials*, v. 49, pp. 455-463, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.046>
- [23] MEDEIROS, M.H.F., RAISDORFER, J.W., *et al.*, “Partial replacement and addition of fly ash in Portland cement: influences on carbonation and alkaline reserve”, *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, v. 2, p. 4-9, 2017. <https://doi.org/10.1007/s41024-017-0023-z>
- [24] CHATVEERA, B., LERTWATTANARUK, P., “Durability of conventional concretes containing black rice husk ash”, *Journal of Environmental Management*, v. 92, pp. 59-66, 2011.
- [25] MIRA, P., PAPADAKIS, V.G., TSIMAS, S., “Effect of lime putty addition on structural and durability properties of concrete”, *Cement and Concrete Research*, v. 32, pp. 683-689, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00744-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00744-X)
- [26] MENDES, Y.G.B., SOUSA, J.M., BARBOSA, I.L.S., “Influência da cal hidratada na massa de concreto convencional”, *Journal of Engineering, Technology, Innovation and Sustainability*, v. 1, n. 1, pp. 17-27, 2019.
- [27] HOPPE FILHO, J., RODRIGUES, C.S., RIBEIRO, L.S.O.P., *et al.*, “Evaluation of sample drying methods to determine the apparent porosity and estimation of degree of hydration of portland cement pastes”, *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, v. 6, pp.1-11, 2021. <https://doi.org/10.1007/s41024-020-00095-x>

- [28] QUARCIONI, V.A., *Influência da cal nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – Estudo em pasta*. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- [29] HOPPE FILHO, J., GOBBI, A., PEREIRA, E., *et al.*, “Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado”, *Matéria (Rio J.)*, v. 22, n. 3, e11872, 2017.