

SÍLICA PROVENIENTE DA QUEIMA DA CASCA DE ARROZ UTILIZADA COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO NO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

RICE HUSK SILICA AS PARTIAL REPLACEMENT OF CEMENT ON A SELF-COMPACTING CONCRETE

Daniela Galiotto Padoin¹; Raquel Caroline Zydeck²; Luis Eduardo Kosteski³; Ederli Marangon⁴.

1. Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, Campus Alegrete – Grupo MAEC, Curso Engenharia Civil. Av. Tiaraju, N° 810 – Ibirapuitã, Alegrete – RS – Brasil, CEP 97546-550.

2. Afiliação

PALAVRAS-CHAVE

Sílica da casca de arroz; Concreto autoadensável; Resistência à compressão axial; Resistência à tração indireta; Sustentabilidade.

KEY WORDS

Rice husk ash; Self-compacting concrete; Axial compressive strength; Splitting tensile strength; Sustainability.

RESUMO

Nesse estudo foi avaliado a substituição parcial do Cimento Portland (CP) pela Sílica proveniente da Casca de Arroz (SCA), fabricada e vendida comercialmente. A substituição do cimento foi realizada em uma composição de Concreto Autoadensável (CAA), a qual foi utilizada por uma Usina de Concreto na cidade de Alegrete – RS. Para este trabalho foram realizados ensaios do concreto no estado fresco e no estado endurecido. Os resultados demonstraram que é possível substituir parcialmente CP por SCA (até 30%) sem que haja prejuízos às resistências mecânicas dos CAAs. O melhor concreto, levando em conta todos os aspectos estudados, foi contendo 20% de substituição. Contudo, a mistura com 30% de substituição pode ser usada em casos que tenham menor densidade de armadura, pois em termos econômicos e de sustentabilidade quanto maior a proporção usada, maior o benefício.

ABSTRACT

This study evaluates a partial replacement of Portland Cement with Silica from Rice Husk. The cement replacement was carried out in a self-compacting concrete composition, which was used by a concrete batching plant in the city of Alegrete – RS. For this work, tests were carried out on the concrete in the fresh and hardened states. The results showed that it is possible to partially replace cement Portland with Rice Husk Silica (up to 30%) without impairing the mechanical behavior of the self-compacting concretes. The best concrete mixture, taking into account all aspects studied, was the one containing 20% of replacement. However, the mix with 30% replacement can be used in cases with lower reinforcement density because, in economic and sustainability terms, the higher the proportion used, the greater the benefit.

1 INTRODUÇÃO

Na última década, só o Brasil produziu cerca de 12 milhões de toneladas de arroz, sendo que 8 milhões foram colhidas apenas no Rio Grande do Sul, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2017). Contudo a cada 4 toneladas de arroz, gera-se 1 tonelada de casca (primeiro resíduo produzido na cadeia da produção do arroz), e a queima desta casca gera energia, que por sua vez produz outro resíduo, a cinza de casca de arroz (CCA), (Ali et al., 1992).

Tanto no Brasil como no exterior diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com a finalidade de empregar a CCA na construção civil, assim como outras cinzas, seja ela para incrementar as propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos ou argamassas, ou para substituir cimento Portland, um dos principais responsáveis por emissões de CO₂ no meio ambiente, (Sequeira; Ghislene, 2020; Mota, et al., 2020; Marangon, et al., 2021). A CCA queimada para a geração de energia, em mais de 95% dos casos é realizada de forma não controlada, o que na cadeia produtiva do concreto se torna perigoso, principalmente para concretos estruturais, pois os efeitos podem ser catastróficos. Destacam-se alguns trabalhos realizados com o uso de CCA em argamassas, concretos e até cerâmicas: (Sugita; Shoya, 1992; Payá et al., 2011; Lima et al., 2011; Tashima et al., 2012; Cordeiro et al., 2014; Gastaldini et al., 2014; Bouzón et al., 2014; Mendes et al., 2017; Stochero et al., 2017; Matos et al., 2018; Nunes et al., 2018; Alcantara et al., 2018; Moura et al., 2018; Klamt et al., 2018; Catillo; Chagas, 2019; Marangon, et al., 2021).

Os concretos de alta resistência, que requerem um alto teor de cimento Portland, estão mais suscetíveis a fissuras indesejadas. Isso ocorre devido ao aumento da retração química, da retração térmica, ou seja, o consumo alto de cimento na composição do concreto, além de gerar um custo maior, também poderá comprometer a durabilidade do concreto. Esse é um dos fatores que potencializam a substituição parcial de cimento por um material pozolânico, o que torna o concreto menos suscetível a apresentar fissuras (referentes a retração) e ainda garante uma zona de transição mais resistente e mais durável (Mehta, 1992). De acordo com os trabalhos de Barbosa (2007) e Silva (2009), os valores de resistência mecânica alcançados têm sido na ordem de até 60 MPa, para a produção de concreto de elevado desempenho com o uso de CCA.

Tutikian e Helene (2011), comentam que no Brasil algumas adições minerais são utilizadas na produção de cimento como substituição parcial do clínquer, como é o caso da cinza volante, argila calcinada e escória de alto forno. Segundo Tiboni (2007), a busca pela utilização da CCA no concreto

não é algo recente. A primeira pesquisa que se tem conhecimento foi em 1924, na Alemanha, onde o autor Beagle apresentou um estudo generalizado sobre o uso de casca de arroz (CA) no concreto. Entre 1940 e 1950, diversos autores realizaram blocos confeccionados com CP e CCA. No ano de 1976 Pitt, realizou estudos sobre o controle de combustão em leito fluidizado, o que garante um maior controle e qualidade da CCA. A primeira substituição do CP por CCA em concreto que se tem conhecimento ocorreu em 1978, na Índia, por Mehta e Pirtz (1978).

Conforme algumas pesquisas citadas por Mehta (1992), pode ser substituído até 70% do cimento de um traço de concreto convencional por CCA, porém, para que se tenha vantagens e aumento de resistência, basta substituir de 10% a 20%. Nessas quantidades já se tem um aumento de resistência mecânica considerável, bem como a diminuição da permeabilidade frente aos agentes agressivos, como, por exemplo, cloretos, sulfatos e CO₂, sem causar nenhum outro efeito contrário ou prejudicial ao concreto. Porém, essas cinzas citadas por Mehta (1992), ou foram produzidas em laboratório (podendo substituir até 70%), ou foram obtidas nos fornos de caldeiras sem qualquer controle de queima (que pode variar muito, logo substituições em pequenas proporções).

A substituição de CCA por CP no concreto autoadensável é um tema muito recente. Existem algumas características que o concreto precisa apresentar em seu estado fresco para ser denominado como concreto autoadensável (CAA), as quais são: fluidez, habilidade de passar por obstáculos e resistência à segregação. Para avaliar a habilidade passante do CAA, os métodos de Anel J, caixa L e caixa U, são os mais utilizados pelo fato de fácil execução, porém sabe-se que a determinação dos parâmetros de tensão de escoamento e viscosidade plástica são de fato os mais indicados.

Neste trabalho foi estudado a variação das características de um concreto autoadensável tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, quando se realiza a substituição parcial do cimento Portland por um resíduo com controle de produção, a sílica proveniente da queima da casca de arroz. Cabe destacar aqui o termo Silica da Casca do Arroz (SCA) por se tratar de um resíduo com queima controlada, o que difere da CCA, onde a queima não é controlada.

2 METODOLOGIA

Neste trabalho, são analisadas as propriedades nos estados fresco e endurecido de um concreto autoadensável, com diferentes teores de substituição de CP por SCA. No estado fresco foi verificada a fluidez, viscosidade aparente, habilidade passante e a resistência à segregação das diferentes misturas. Para analisar as propriedades mecânicas no estado endurecido, foram moldados corpos de

prova cilíndricos com dimensões 10 x 20 cm, onde foram analisadas as resistências à compressão axial e a resistência à tração por compressão diametral, aos 7, 28, 56 e 91 dias, para todas as composições de concreto estudadas.

A composição da mistura do concreto autoadensável escolhido, é utilizado em uma usina de concreto da cidade de Alegrete – RS, para resistência à compressão axial equivalente à 25 MPa. A moldagem desta mistura de concreto foi considerada como a de referência (Ref.). Para as outras misturas de concreto, foram substituídos 10, 20 e 30% em massa, de CP por SCA. Estes valores de substituição foram definidos para determinar a quantidade ótima de substituição desse material comercializado (entre 10 e 20%) encontrada por Mehta (1992). As composições das misturas estudadas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição das misturas de concreto autoadensável.

Material (Kg)	Referência (Ref.)	10% de Subs.	20% de Subs.	30% de Subs.
Cimento	400,00	360,00	320,00	280,00
SCA	0,00	40,00	80,00	120,00
Água	210,00	210,00	210,00	210,00
Superplastificante	3,20	3,20	3,20	3,20
Agregado Miúdo	731,00	731,00	731,00	731,00
Agregado Graúdo	904,00	904,00	904,00	904,00

2.1 Matérias-primas

Como agregado miúdo, foi utilizada uma areia média com diâmetro máximo de 2,36 mm, módulo de finura de 1,84 e massa específica de 2,66 g/cm³. Este material é comercializado na cidade de Alegrete – RS. De agregado graúdo, utilizou-se brita com diâmetro máximo de 9,5 mm, também comercializado na cidade de Alegrete – RS, e possui massa específica de 3,50 g/cm³. O cimento utilizado neste estudo foi o CP IV-32 Votoran, que foi doado pela Usina de concretagem. A massa específica deste cimento é de 2,91 g/cm³. Neste estudo, fez-se o uso do aditivo superplastificante ViscoCrete® 5700, da Sika. O mesmo, segundo o fabricante, atende os requisitos da norma NBR 11768 (2011), nos tipos SP-I N e SP-II N. Este aditivo possui uma densidade de 1,07 kg/litro.

Para a substituição do cimento Portland, utilizou-se a Silcca® Nobre SC-1, produzida a partir da queima da casca do arroz em leite fluidizada a temperatura de aproximadamente 750 °C. O material utilizado é produzido pela empresa Sílica Verde do Arroz Ltda, localizada na cidade de Alegrete –

RS e comercializada pelo Grupo Pilecco Nobre Ltda. A Tabela 2 apresenta as características químicas da SCA, assim como os valores de perda ao fogo que foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 2 – Composição química da SCA.

Perda ao Fogo (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO ₃ (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	CaO (%)	K ₂ O (%)	MnO (%)	P ₂ O ₅ (%)
3,50	91,48	0,00	0,05	0,32	0,15	0,04	0,36	1,40	0,32	0,45

A massa específica da SCA é de 2,16 g/cm³. De acordo com Marangon et al. (2013), a área superficial da SCA é de aproximadamente 21000 m²/kg e também através da análise de difração de raio-x, a mesma apresenta uma estrutura predominante amorfa, onde os autores utilizaram o mesmo material em outro estudo. Neste trabalho foi identificado que o índice de atividade pozolânica (NBR 5354/2014, 2014) desta sílica da casca de arroz com o cimento, é de 1,03, que significa 103% de resistência à compressão em relação do cimento Portland sem substituição. Através da NBR 15895 (2010), foi determinada a pozolanicidade da sílica através do método Chapelle modificado, e o valor encontrado foi de 1379,37 miligramas (mg) de Ca(OH)₂ por grama (g) de material, caracterizando assim que o material possui boa atividade pozolânica.

2.2 Caracterização do CAA no estado fresco

Para todas as misturas de concreto estudadas, foram analisadas as características de fluidez, viscosidade aparente, habilidade passante e resistência à segregação, em seu estado fresco. Estas características foram avaliadas através dos ensaios de Espalhamento (slump flow), Anel J, Funil V e Caixa U. Todos os ensaios foram realizados conforme as recomendações da Efnarc (2002). O ensaio slump-flow determina o espalhamento ou fluidez do concreto. A viscosidade aparente é medida através do ensaio do Funil V. Para verificar a habilidade passante do CAA foi utilizado ensaio da caixa U e anel J. A segregação foi avaliada de forma visual após o espalhamento em duas situações: após o espalhamento slump flow e após o espalhamento com o uso do anel J.

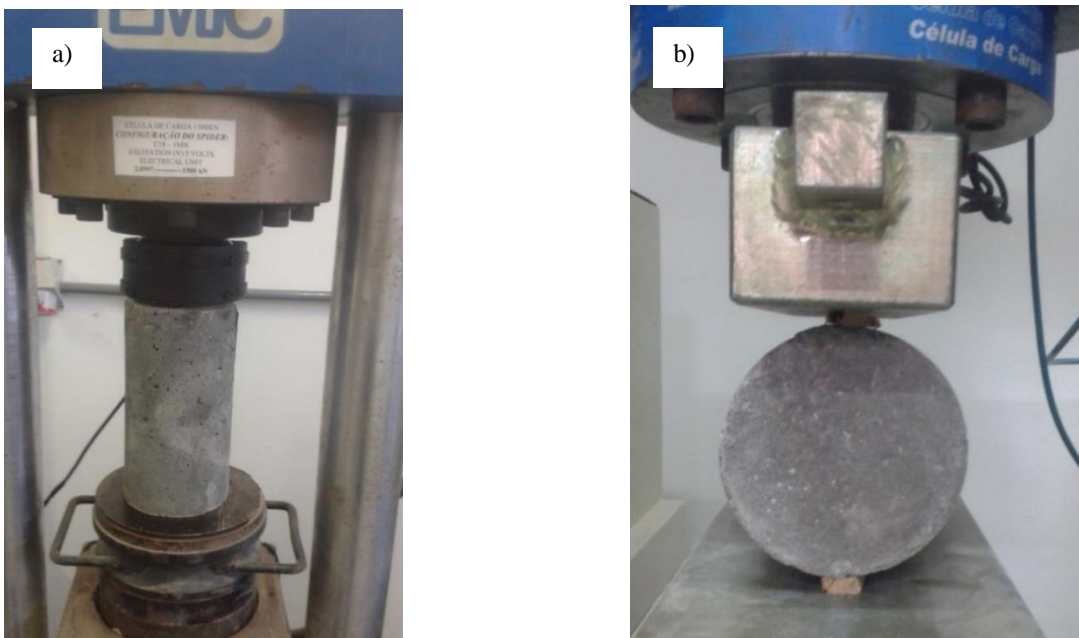
2.3 Caracterização no estado endurecido

Para verificar as propriedades no estado endurecido, foram realizados ensaios mecânicos de resistência à compressão axial e de resistência à tração por compressão diametral, nas idades de 7, 28, 56 e 91 dias de cura. O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado conforme a norma

NBR 5738 (2016), utilizando uma prensa da marca EMIC PC 150, com capacidade de carga de 1500 kN. O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado conforme a NBR 7222 (2011). Para a realização desse ensaio foi utilizada a máquina de ensaios universais EMIC DL 20000, com velocidade de deslocamento do travessão à 3 mm/s e capacidade de carga de 200 kN.

Foram moldados e curados 3 corpos de prova para cada mistura de concreto. Os corpos de prova possuíam dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Os mesmos foram mantidos até o início dos ensaios em câmara úmida, com no mínimo de 95% de umidade a uma temperatura de $(23 \pm 2^\circ\text{C})$. Os procedimentos de moldagem foram seguidos conforme a NBR 5738 (2016). Na Figura 1, mostram-se os layouts destes ensaios.

Figura 1 – Layout dos ensaios: a) resistência à compressão axial; b) resistência à tração por compressão diametral.



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades no estado fresco

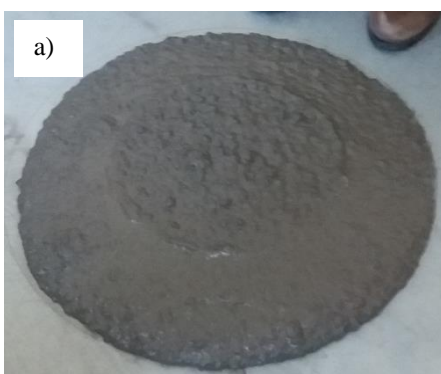
Os resultados encontrados para a avaliação do estado fresco dos concretos autoadensáveis produzidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado dos CAAs no estado fresco.

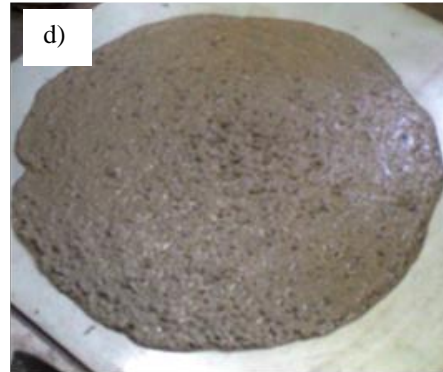
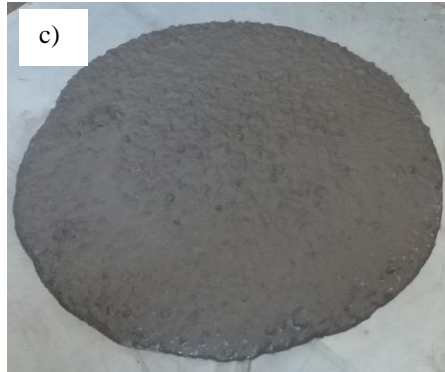
Misturas	Espalhamento (mm)	Anel J (mm)	Funil V (seg.)	Caixa U (mm)
Ref.	665	20	11	1,5
10%	635	25	11	2
20%	597	22	11	4
30%	525	50	17	8
EFNARC (2002)	550 – 850	0 – 10	6 – 12	0 – 30
NBR 15823 (2017)	550 – 850	0 – 50	Máx. 25	Máx. 30

Segundo a Efnarc (2002) e a NBR 15823 (2017) **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, o CAA pode ser aplicado em estruturas de concreto armado e pré-moldados desde que atenda os valores máximos e mínimos no estado fresco, apresentados na Tabela 3. Ao analisar a Tabela 3, percebe-se que com o aumento da substituição da SCA, para todos os ensaios e concretos estudados, as misturas apresentaram perdas em algumas propriedades do CAA, principalmente no quesito da trabalhabilidade. Pode-se verificar que através da Efnarc (2010) os valores encontrados para o ensaio Anel J, não ficaram nos limites, ou seja, o concreto autoandensável ficou muito fluído (o que não vai de acordo com os outros ensaios). Porém, seguindo a NBR 15823 (2017), todas as misturas estudadas pelo ensaio do anel J ficaram dentro do limite, podendo considerar assim um concreto autoadensável. Todas as misturas se mantiveram sem segregação, garantindo a homogeneidade das mesmas, conforme pode ser observado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Nesta Figura se constata que em todos os concretos estudados há uma distribuição uniforme dos agregados desde o centro do espalhamento até a borda.

Figura 2 – Imagens das misturas após o ensaio de espalhamento: a) concreto de referência, b) 10% de substituição, c) 20% de substituição e d) 30% de substituição.

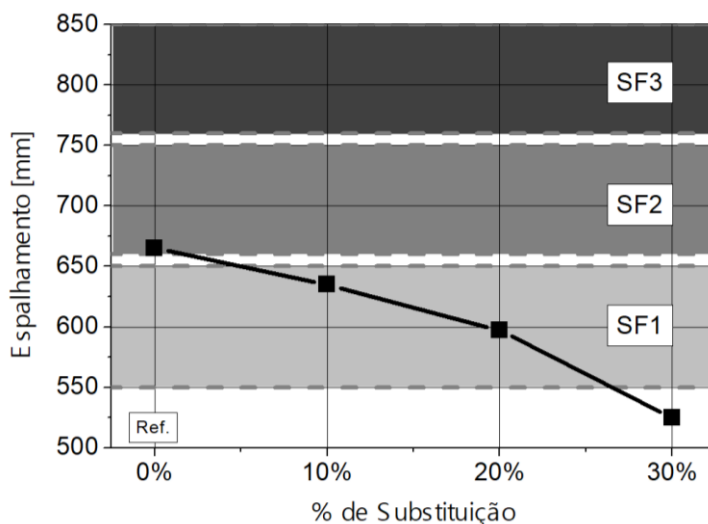


b)



Na Figura 3, mostra-se a comparação entre o diâmetro de espalhamento obtido e o percentual de SCA substituído na mistura. É possível perceber que à medida em que aumenta esse percentual, o diâmetro de espalhamento decresce, alterando a propriedade de fluidez do concreto. A perda da trabalhabilidade se dá pelo fato da SCA conter partículas com tamanho muito similares ao do cimento, porém, com uma área superficial maior, o que exige um aumento no consumo da água da mistura, ou um aumento na quantidade de superplastificante.

Figura 3 – Diâmetro de espalhamento *versus* percentual de substituição de SCA.



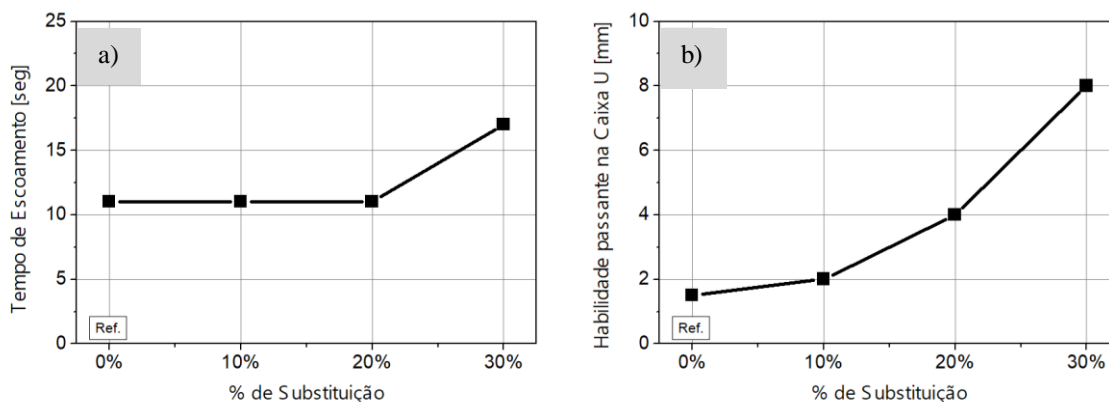
A partir da Figura 3, percebe-se que a maioria das misturas se manteve na Classe SF1, a qual é recomendada para estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, onde a concretagem é realizada a partir de um ponto mais alto, com deslocamento livre. Apenas a mistura

com 30% de substituição de SCA ficou abaixo dos valores normatizados, impossibilitando assim em parte o uso desse concreto.

Na Figura 4a), apresenta-se o gráfico do tempo de escoamento, obtido através do ensaio do Funil V. Percebe-se que todas as misturas apresentam tempo de escoamento abaixo do limite máximo, de 25 segundos, seguindo a NBR 15823 (2017). Porém, a mistura contendo 30% de substituição possui um valor do tempo de escoamento maior quando levado em consideração a Efnarc (2002) **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Assim, pode-se concluir que seguindo a norma brasileira todas as misturas estão dentro dos limites em seu tempo de escoamento para ser considerado um concreto autoadensável, no entanto, seguindo a Efnarc (2002) a mistura de 30% de substituição não é considerada um concreto autoadensável.

Na Figura 4b) está apresentado a variação da habilidade passante na Caixa U de todos os concretos estudados. O ensaio foi realizado com a finalidade de analisar e verificar a habilidade passante do concreto quando deparado com obstáculos, no caso, barras de aço. Percebe-se que na medida em que se aumenta o percentual de substituição, a habilidade passante diminui, isso deve-se principalmente pela área superficial da SCA, que demanda mais água e/ou superplastificante para “molhar/azeitar/untar” suas partículas.

Figuras 4 – Porcentagem de substituição de SCA em relação ao: a) tempo de escoamento e b) habilidade passante na caixa U.



3.2 Propriedades no estado endurecido

Para a determinação das propriedades do concreto no estado endurecido, foram verificadas as resistências à compressão axial e as resistências à tração por compressão diametral. Para todos os resultados dos ensaios mecânicos foram realizadas análises estatísticas das variâncias (ANOVA),

para verificar se ocorreu alguma variância significativa (com confiança de 95%) nos resultados encontrados para auxiliar nas conclusões.

3.2.1 Resistência à compressão axial

Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada idade: 7, 28, 56 e 91 dias. A média dos resultados encontrados é apresentada na Tabela 4, bem como o coeficiente de variação entre as amostras.

Tabela 4 – Resultado de resistência à compressão axial.

Misturas	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	56 dias (MPa)	91 dias (MPa)
	– CV (%)	– CV (%)	– CV (%)	– CV (%)
Ref.	17,15 – 6,09	27,68 – 3,47	31,59 – 8,33	33,11 – 12,28
10%	17,76 – 1,11	25,92 – 8,97	32,30 – 5,66	36,01 – 7,86
20%	15,05 – 3,73	27,78 – 7,39	38,94 – 5,12	39,19 – 16,94
30%	13,00 – 8,46	27,77 – 6,67	34,92 – 6,22	35,41 – 3,44

É possível perceber que todos os concretos, mesmo com as substituições, atingiram a resistência estimada de 25 MPa, aos 28 dias, sendo que nessa idade, o menor valor encontrado foi para a mistura com a substituição de 10% e os demais permaneceram muito próximos uns dos outros.

Através da análise de variância dos resultados dos ensaios à compressão axial, apresentado na Tabela 5, foi possível concluir que as médias populacionais, tanto a idade como a porcentagem de SCA substituída, com um nível de confiança de 95%, são significativamente diferentes. Fazendo uma comparação múltipla de médias das idades (entre 7 e 28, 28 e 56, e 56 e 91 dias) dos concretos estudados, pelo método de Tukey, somente entre as idades de 56 e 91 dias, as diferenças das médias não são significantes. Isto significa que nos concretos testados não se observa aumento estatisticamente confiável da resistência à compressão axial depois dos 56 dias. Analisando o efeito da substituição, é possível detectar que somente há diferença significativa entre o concreto de referência com substituição de 20% de CP por SCA. Isto se deve a grande variabilidade encontrada em algumas das amostras. Talvez se aumentar o número de corpos de prova ensaiados seja possível ter certeza estatística da diferença entre os outros níveis do experimento (entre o concreto de referência e 10% ou 30% de substituição, por exemplo). Ainda assim é interessante salientar que o concreto com substituição de 30% de CP por SCA, aos 91 dias apresenta maior resistência à compressão axial comparado ao concreto de referência.

Tabela 5 – Análise da Variância (ANOVA) para a resistência à compressão axial dos CAAs com substituição parcial de CP por SCA.

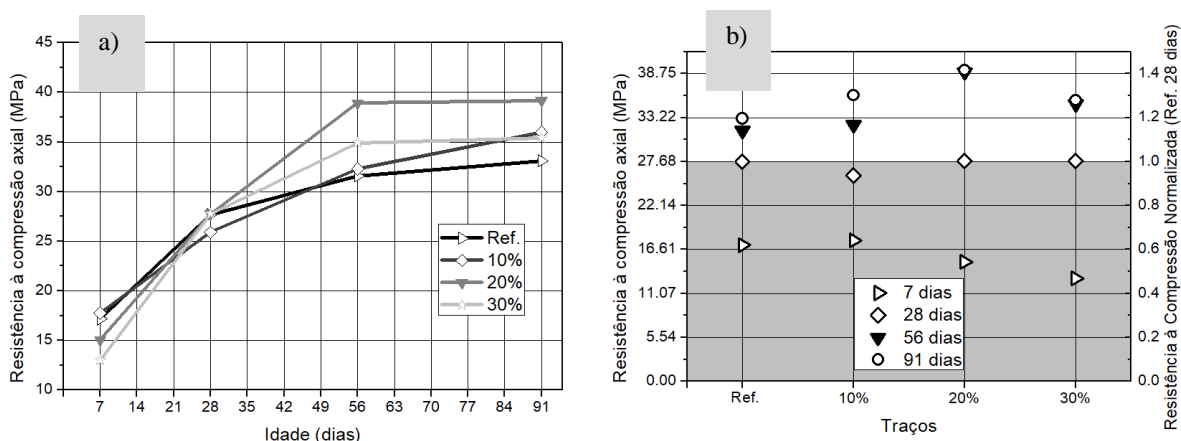
Varição	SQ	GL	MQ	F	F crítico
% CCA	59.465	3	19.822	3.025	2.901
Idade	3056.485	3	1018.828	155.504	2.901
Interação	146.198	9	16.244	2.479	2.189
Erro	209.657	32	6.552		
Total	3471.805	47			

Notas: SQ – Soma quadrática; GL – Grau de Liberdade; MQ = SQ/GL – Média Quadrada; F – Valor calculado de F; F crítico – Valor tabelado para níveis de significância 0,05.

A Figura 5a), apresenta a variação da resistência à compressão axial das diferentes misturas analisadas. É possível perceber que a resistência à compressão aumenta com a idade, independente do percentual de SCA substituída. Observa-se também, que o comportamento de todas as curvas está de acordo com o esperado, onde a resistência do concreto aumenta consideravelmente até os 28 dias, sendo que se mantém praticamente constante a partir dos 56 dias.

Para analisar a influência das porcentagens de substituição e sua interação com a idade, optou-se por normalizar os resultados em relação à resistência do concreto de referência aos 28 dias (27,68 MPa). Desta forma, a Figura 5b) mostra os valores médios da resistência à compressão axial para cada porcentagem de substituição analisada e para cada idade.

Figuras 5 – a) evolução de resistência média à compressão axial com a idade e b) valores médios de compressão axial.



A resistência média à compressão axial do CAA do concreto de referência obtida aos 7 dias, ficou próxima da mistura contendo 10% de SCA. Para esta idade, quanto maior a substituição do cimento SCA, menor é a resistência à compressão axial obtida. Observa-se então, que nas baixas idades o responsável pelo aumento de resistência é o cimento Portland.

Aos 28 dias, não se observa diferenças de resistência à compressão axial entre os quatro tipos de concretos analisados, sendo levemente inferior a resistência do CAA com substituição de 10%. Entre as idades de 56 e 91 dias, não há diferenças estatisticamente significativas entre as idades, porém, entre os CAAs há sim diferenças. Pode-se observar que o concreto 20% apresentou resistência maior entre os demais.

Em geral, os concretos com substituição parcial de CP por SCA obtiveram ganho de resistência à compressão axial com aumento da idade. Isto pode ser explicado devido ao fato que durante a hidratação do cimento Portland são produzidos silicatos de cálcio hidratado (CSH) e hidróxidos de cálcio (CH). Assim, esses CH produzidos pelas reações de hidratação do cimento, juntamente com água forma e a SCA geram novos produtos da hidratação, isto é, mais CSH. Esta segunda reação é mais lenta devido ao tamanho das partículas da SCA, além de necessitar que já tenha CH livre na mistura, e água, para a formação de novos produtos de CSH. Isso potencializa o aumento das resistências à compressão dos concretos que possuem SCA na sua composição em relação ao concreto de referência, sobre tudo, para idades mais elevadas.

3.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Na Tabela 6, está apresentada a média dos resultados encontrados para o ensaio à tração por compressão diametral e o coeficiente de variação. Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada idade 7, 28, 56 e 91 dias.

Tabela 6 – Resultado de resistência à tração por compressão diametral.

Misturas	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	56 dias (MPa)	91 dias (MPa)
	– CV (%)	– CV (%)	– CV (%)	– CV (%)
Ref.	1,65 – 3,36	1,65 – 20,86	2,69 – 4,08	2,72 – 12,03
10%	1,48 – 12,49	2,33 – 12,03	2,41 – 9,00	2,98 – 5,96
20%	1,37 – 8,82	2,06 – 17,24	2,77 – 26,14	3,21 – 32,19
30%	1,22 – 4,89	2,72 – 6,47	2,66 – 21,21	2,72 – 13,89

Encontrou-se, com um nível de significância 0,05, a qual corresponde um grau de confiança superior a 95%, em que somente as médias populacionais da idade são significativamente diferentes da resistência à tração. Desta forma, para a resistência à tração por compressão diametral, não há diferença entre substituir, ou não, CP por SCA. Na Tabela 7, está apresentada a análise de variância realizada para esses resultados.

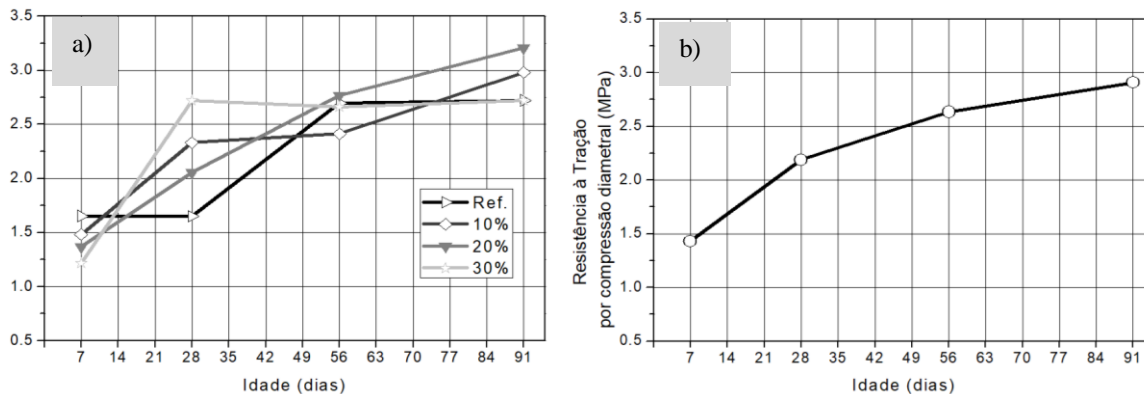
Tabela 7 – Análise da Variância (ANOVA) para a resistência à tração por compressão diametral dos CAAs com substituição parcial de CP por SCA.

Varição	SQ	GL	MQ	F	F crítico
% CCA	0.210	3	0.070	0.422	2.901
Idade	14.981	3	4.994	30.081	2.901
Interação	2.633	9	0.293	1.762	2.189
Erro	5.312	32	0.166		
Total	23.137	47			

Notas: SQ – Soma quadrática; GL – Grau de Liberdade; MQ = SQ/GL – Média Quadrada; F – Valor calculado de F; F crítico – Valor tabelado para níveis de significância 0,05.

A Figura 6a), apresenta a resistência média à compressão diametral dos diferentes concretos analisados para as diferentes idades de rompimento, isto é, a influência da idade nos resultados. Como a porcentagem de substituição de CP por SCA não é estatisticamente significativa, a Figura 6b) mostra as médias gerais para cada idade estudada.

Figuras 6 – a) resistência média à compressão diametral para cada mistura em todas as idades e b) efeito da idade do concreto na resistência à tração por compressão diametral.



Através da Figura 6a), percebe-se que os valores de resistência à tração por compressão diametral dos concretos ficaram muito próximos, apenas tendo uma variação considerável entre elas aos 28 dias de idade. Ainda, observa-se que com o avanço das idades, o valor continua aumentando e apenas o concreto 30% de substituição se mantém constante a partir da idade de 28 dias. As resistências à tração por compressão baixas, encontradas no concreto de referência aos 28 dias podem estar relacionadas a falhas na concretagem, temperatura no momento da moldagem ou até o próprio tipo de ensaio que apresenta muita variabilidade.

3.3 Verificação da viabilidade econômica e sustentável quanto à substituição de CP por SCA

Como a única diferença nos concretos estudados é a quantidade de cimento Portland substituído por SCA, sendo que o cimento é o material mais caro e durante sua produção lança mais CO_2 no ambiente que a SCA, então quanto mais cimento é substituído, mais econômico e sustentável se torna o concreto. Em julho de 2019, o CP IV 32 Votoran, foi comercializado na região por R\$ 0,61 o Kg e a SCA por R\$ 0,50. A diferença entre os custos é de R\$ 0,11 por Kg, o que representa 18,03% do valor do quilograma de cimento.

Assim, o concreto com 10% de substituição de CP por SCA, terá uma redução de custo de 1,80% em relação ao concreto de referência, sem substituição. Da mesma forma os concretos com 20 e 30% de substituição terão redução do custo de 3,61% e 5,41% em relação ao concreto de referência, respectivamente.

Porém, a depender do tipo de usina em que está sendo executado, é preciso levar em conta a mão de obra necessária para tal substituição. Por exemplo, na cidade de Alegrete – RS, a usina local, está fazendo uso de SCA em seus concretos, a fim de diminuir os custos e ter aumento de resistência mecânica e qualidade do seu produto final. No entanto, pelo fato de a usina não ser totalmente automatizada, é preciso dispor de no mínimo 2 colaboradores para realizar a colocação manual das sacas de SCA no caminhão betoneira, o que não viabiliza a utilização de um percentual muito elevado de substituição da SCA. Nessa condição, a porcentagem viável é de 10%. Como alternativa a usina precisaria instalar um silo para estocar a SCA, que também tem um custo inicial de investimento, porém a longo prazo isso se dilui.

Outro fator que deve ser analisado, no quesito viabilidade econômica, é o volume de concreto produzido, pois em volumes menores, esse percentual de economia, citado anteriormente, não será muito significativo, por outro lado, no momento que o volume for maior, esse percentual passa a ser relevante. Por exemplo, em um edifício de paredes de concreto, onde o concreto é o maior insumo, representa entre 10 a 13% do valor total da obra. A partir dessa porcentagem representativa do custo total da obra, a redução de custo, com a substituição de CP por SCA, por exemplo, com uso do concreto de 20% de substituição, pode significar uma redução de 0,36 a 0,47% do total da obra, a depender do volume nela empregado.

No que tange a questão sustentável, a indústria cimenteira é responsável por cerca de 29,7% das emissões de CO₂ da atmosfera (isso pode variar de acordo com a demanda pelo cimento). Para produção de 1 tonelada de cimento, estima-se que 800 kg de CO₂ é lançado na atmosfera (média mundial, no Brasil estima-se ao redor de 650 kg CO₂/ton. de cimento devido as substituições permitidas nas normas ABNT, 2019). Para os concretos estudados, pode-se concluir que quanto maior o teor de substituição mais sustentável é a mistura, uma vez que, a resistência obtida aos 28 dias, idade de referência, todas as misturas apresentaram valores superiores ao necessário (25MPa). Assim, o concreto mais sustentável é o com substituição de 30% de cimento por SCA.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi usado SCA para substituir CP na produção de concretos autoadensáveis. Foi avaliado o incremento da substituição do CP por SCA nas propriedades referentes ao estado fresco e endurecido.

Foi observado que o aumento do teor de substituição de CP por SCA influenciaram nas propriedades reológicas dos concretos no estado fresco. A influência apresentada é que os concretos perderam fluidez, porém, ainda se mantiveram com propriedades adequadas para ser considerado concretos autoadensáveis. Observou-se ainda que, com o aumento do teor de substituição, houve um acréscimo na coesão e na viscosidade aparente dos concretos no estado fresco quando comparado ao concreto de referência.

No estado endurecido, verificou-se que a resistência à compressão axial, quando substituir CP por SCA, melhorou os resultados obtidos. Todos os concretos tiveram ganho de resistência quando comparado com ao de referência a longo prazo. Em termos de resistência à compressão, a substituição ideal é de 20%, por apresentar aumento considerável (de 160,40%) entre as idades de 7 e 91 dias. Em relação a resistência à tração por compressão diametral, o concreto contendo de 20% de substituição, nas idades de 56 e 91 dias, apresentou valores superiores às demais misturas estudadas.

Com relação a viabilidade econômica foi possível concluir que a mistura contendo 10% de substituição é a mais viável, devido as condições e estrutura da empresa concreteira. No entanto, com a automatização do sistema e a instalação de um silo, a porcentagem de 30% se torna a mais viável a longo prazo.

Como conclusão geral deste trabalho, ficou demonstrado que o uso da SCA é viável e até vantajosa. A maior quantidade de substituição, 30%, pode ser utilizada em obras específicas, com a utilização de vibradores para fazer o devido adensamento, já que não há perda do ponto de vista mecânico (resistência à compressão) e se ganha muito economicamente e ecologicamente, já que uma maior quantidade de resíduo (SCA) é utilizado. Por fim, cabe ressaltar que estudos com maior quantidade de substituição podem ser realizados, mas não para concretos autoadensáveis, uma vez que os prejuízos de trabalhabilidade foram detectados e ajustes com um maior uso de superplastificante inviabiliza a produção de concretos dessa família.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FAPERGS, CNPQ e Capes, que fizeram e fazem o possível para a realização de nossas pesquisas.

Contribuições dos autores

Daniela Galiotto Padoin: obtenção dos dados, análise formal, análise estatística. Raquel Caroline Zydeck: redação da minuta (1ª versão), análise formal, validação de resultados, redação – revisão e edição. Luis Eduardo Kostascki: conceituação, metodologia, supervisão, revisão. Ederli Marangon: conceituação, metodologia, supervisão, revisão.

Declaração de conflito de interesses

Os autores deste trabalho declaram que não possuem conflito de interesse de ordem financeiro, comercial, político, acadêmico ou pessoal.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 5738 (2016). Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: Associação de Normas Técnica.
- ABNT NBR 5752 (2014). Materiais Pozolânicos – Determinação da Atividade Pozolânica com Cimento Portland – Índice de Atividade Pozolânica com Cimento – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: Associação de Normas Técnica.
- ABNT NBR 7222 (2011). Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação de Normas Técnica.
- ABNT NBR 11768 (2011). Aditivos químicos para concreto de Cimento Portland. Rio de Janeiro: Associação de Normas Técnica.
- ABNT NBR 15823 (2017). Concreto autoadensável; Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro: Associação de Normas Técnica.
- ABNT NBR 15895 (2010). Materiais Pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro: Associação de Normas Técnica.
- Alcantra, M. A. M., Mello, A. B. A., Albuquerque, M. C. F. (2018). A influência potencial das cinzas de casa de arroz em argamassas auto adensáveis: casos de resistência mecânica e da absorção d'água. *Revista Matéria, UFRJ - RJ*, (Vol. 23(3)) <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0487>.
- Ali, F. H., Adnan, A., Choy, C. K. (1992a). Use of rice husk ash to enhance lime treatment of soil, *Canadian Geotechnical Journal* (Vol. 29(5)). Recuperado de <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/t92-091>.
- Barbosa, M. B. (2007). Utilização de cinzas de casca de arroz e borracha de pneus em concreto de elevado desempenho, (Dissertação de Mestrado). FEIS/UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil.

- Bouzón, N., Payá, J., Boracheiro, M. V., Soriano, L., Tashima, M. M., Monzó, J. (2014). Refluxed rice husk ash/NaOH suspension for preparing alkali activated binders. *Materials Letters*. (Vol. 115) <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.10.001>.
- Castilho, R. L., Chagas, G. C. (2019). Effect of Rice Husk Ash as Supplementary Cementitious Material on the Performance of Cement-Based Pastes Continuously Exposed to Organic Acid Solution (Vinasse). *Journal of Materials in Civil Engineering*, (Vol. 31(7)) <https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002739>.
- Cimento (2019). ORG. O mundo do cimento. Disponível em: <https://cimento.org/cimento-nacional-tem-menor-emissao-de-co2-que-media-mundial/>. Acessado em 07/2019.
- Conab (2017). Companhia Nacional de Abastecimento. Perspectivas para a agropecuária/Campanha Nacional de Abastecimento. Recuperado de <http://www.conab.gov.br>.
- Cordeiro, L. N. P., Masuero, Â. B., Dal Molin, D. C. C. (2014). Análise do potencial pozolânico da cinza de casca de arroz (CCA), através da técnica de refinamento de Reitveld. *Revista Matéria, UFRJ* (Vol. 19) <https://doi.org/10.1590/S1517-70762014000200009>.
- Efnarc (2002). Specification and guidelins for self-compactiong concrete Applications to reproduce all or part of this document should be made to Efnarc at the address shown on the title page, Reino Unido, disponível em: www.efnarc.org.
- Efnarc (2005). European guidelines for self-compacting concrete: Specification, production and use. Reino Unido: European Federation of National Trade Associations Representing Producers and Applicators of Specialist Building Products.
- Gastaldini, A. L. G., Silva, M. P., Zamberlan, F. B., Mostardeiro Neto, C. Z. (2014). Total shrinkage, chloride penetration, and compressive strength of concretes that contain clear-colored rice husk ash. *Construction & Building Materials* (Vol. 54) <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.044>.
- Klamt, R. A., Fontoura, P. R., Budny, J., Dos Santos, F. F. (2018). Estudo da utilização da reciclagem de Concreto Asfáltico como camada de Pavimento. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, (Vol. 7(3)) <https://doi.org/10.5585/geas.v7i3.782>.
- Lima, S. P. B., Vasconcelos, R. P. D., Paiva, O. A., Cordeiro, G. C., Chaves, M. R. D. M., Toledo Filho, R. D., Fairbair, E. D. M. R. (2011). Production of sílica gel from residual rice husk ash. *Química Nova* (Vol. 34) <https://www.scielo.br/j/qn/a/8xjgZXhMpLsy89JQTvPwcQg/?format=pdf&lang=en>.
- Marangon, E., Kulzer, F. E., Cocco, G. D., Meichtry, R. S., Mendonça, L. C., Kostascki, L. E., Da Costa, F. B. P., De Oliveira, M. D. J. D. (2021). Argamassas produzidas com sílica de CASCA de arroz ambientalmente sustentável: Propriedades reológicas. *Journal of Cleaner Production*, (Vol. 287) <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125561>.

- Marangon, E., Marton, L. F., Soares, E. L., Mendes, G. G., Martins, R. P., Silva, D. M. G. (2013). Atividade Pozzolânica da sílica da casca de arroz por combustão em leito fluidizado, Anais, In: 55º Congresso Brasileiro de Concreto (CBC), Ibracon, Gramado.
- Matos, P. R., De Oliveira, A. L., Pelisser, F., Prudêncio JR, L, R. (2018). Rheological behavior of Portland cement pastes and self-compacting concretes containing porcelain polishing residue. *Construction and Building Materials*, (Vol. 175)
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.212>.
- Mehta, P. K. (1992). Rice Husk Ash, A unique supplementary cement material. *Proceedings of the international symposium on advances in concrete technology*. Athens, Greece.
- Mehta, P. K., Pirtz, D. (1978). Use of rice hull ash to reduce temperature in high strength mass concrete. *ACI Journal*, (Vol. 75 (7)).
- Mendes, M., Elton, B., Silva, F. (2017). Avaliação dos parâmetros de autoadensabilidade e de reologia do concreto autoadensável. *Revista Matéria UFRJ – RJ*, (Vol. 22(4))
<https://doi.org/10.1590/S1517-707620170004.0212>.
- Moura, A., Bolba, C., Demori, R., Lima, L. P. F. C., Santana, R. M. (2018). Effect of Rice Husk Treatment with Hot Water on Mechanical Performance in Poly(hydroxybutyrate)/Rice Husk Biocomposite, *Journal of polymers and the Environment*, (Vol. 26(6)) <https://doi.org/10.1007/s10924-017-1156-5>.
- Mota, D. M. P., Diniz, S. J. S., Reis, A. C. M., Alcântara, D. S., Costa, E. H. G., Campos, G. S.; Abreu, L. O., Carvalho, N. (2020). Adição da Cinza da Folha de Bananeira na Argamassa. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental* (Vol. 9).
- Nunes, M. L., Damin, E., Risson, D. B. S. (2018). Viabilidade do uso da cinza da casca de arroz na produção do concreto de pós reativos, Anais, In: 60º Congresso Brasileiro de Concreto (CBC), Ibracon, Foz de Iguaçu.
- Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Mellado, A., Ordoñez, L. M. (2001). Determination of amorphous sílica in rice husk ash by a rapid analytical method. *Cement and Concrete Research* (Vol. 31) <https://wenku.baidu.com/view/851b9868011ca300a6c3902f.html>.
- Pitt, N. U. S. (1976). Patent No. 3.959,007. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Sequeira, E. M., Ghisleni, G. (2020). A influência da Adição de Filler Calcário em Substituição Parcial ao Cimento em Argamassa Estabilizada de Revestimento de Paredes e Tetos. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental* (V. 9) <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v9e0202020-38>.
- Silva, E. J. (2009). Contribuição para utilização de cinzas de casca de arroz na construção civil, (Dissertação de Mestrado), FEIS/UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil.

- Sugita, S., Shoya, M. (1992). Evaluation of Pozzolanic Activity of Rice Husk Ash, Special Publication (Vol. 132).
- Stochero, N. P., Marangon, E., Nunes, A. S., Tier, M. D. (2017). Desenvolvimento de cerâmicas refratárias a partir de sílica residual derivada de cinza de casca de arroz e fibras de aço. *Ceramics International*, (Vol. 43 (16)) <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.07.111>.
- Tashima, M. M., Fioriti, C. F., Akasaki, J. L., Payá, J., Souza, L. C., Melges, J. L. P. (2012). Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa método de produção e atividade pozolânica. *Revista Ambiente Construído* (Vol. 12) <https://doi.org/10.1590/S1678-86212012000200010>.
- Tiboni, R. A. (2007). A utilização da cinza da casca de arroz em termoelétricas como componente de aglomerante de compósitos à base de Cimento Portland, (Dissertação de Mestrado), Programa de Pós-Graduação Escola de Engenharia de São Carlos, departamento de Engenharia de Estruturas, São Paulo, SP, Brasil.
- Tutikian, B. F., Helene, P. (2011). Dosagem dos concretos de Cimento Portland, In: 53º Congresso Brasileiro de Concreto, Florianópolis: Centrosul.