

ESTUDO DA DOSAGEM DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO (CAD) COM UTILIZAÇÃO DE SÍLICA DA CASCA DO ARROZ E OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO PORTLAND PARA APLICAÇÃO EM PILARES

Study of high-performance concrete (HPC) dosage using rice husk silica and optimization of Portland cement consumption for application in pillars

Estudio de la dosificación de concreto de alto rendimiento (CAD) utilizando sílice de cáscara de arroz y optimización del consumo de cemento Portland para su aplicación en pilares

MERCÊS, C.B.¹; NEVES, R.D.²; GANASINI, D.³; EFFTING, C. ⁴; SCHACKOW, A.⁵

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo sobre a dosagem de concretos de alto desempenho utilizando sílica da casca de arroz. Foram avaliados dois tipos de aditivos superplastificantes: o aditivo A e o aditivo B. A sílica da casca de arroz utilizada foi caracterizada através de sua composição química por fluorescência de raios-X e determinação do índice de desempenho com cimento Portland. A consistência dos concretos foi verificada através do abatimento de tronco de cone. No estado endurecido, foram realizados ensaios de resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e massa específica. Com os resultados obtidos, foi desenvolvida uma análise estatística incluindo intervalo de confiança Bootstrap e análise de variância multivariada (MANOVA). Foram executados cálculos estruturais comparativos entre o concreto de alto desempenho com maior resistência e um concreto convencional de 30 MPa, comprovando a viabilidade do material produzido. Pode-se constatar ainda a redução do consumo de cimento Portland, quando comparadas as categorias de concreto estudados.

Palavras-chave: CAD; otimização do consumo; cimento Portland.

¹ Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEU, da Universidade do Estado de Santa Catarina. clovismerces.engengariacivil@gmail.com

² Engenheiro Civil Universidade do Estado de Santa Catarina. nevesruann@gmail.com

³ Mestra em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEU, da Universidade do Estado de Santa Catarina [orcid: 0000-0003-3433-8926](https://orcid.org/0000-0003-3433-8926) debiganasini@gmail.com

⁴ Professora Doutora no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEU, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC [orcid: 0000-0001-5457-5457](https://orcid.org/0000-0001-5457-5457) carneane.effting@udesc.br

⁵ Doutor no Departamento de Engenharia Civil, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. [orcid: 0000-0003-2561-5231](https://orcid.org/0000-0003-2561-5231) adilson.schackow@udesc.br

Data da Submissão:
21dezembro2023
Data da Aprovação:
10fevereiro2024
Data da Publicação:
20março2024

COMO CITAR:

MERCÊS, C.B.; NEVES, R.D.; GANASINI, D.; EFFTING, C.; SCHACKOW, A.. ESTUDO DA DOSAGEM DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO (CAD) COM UTILIZAÇÃO DE SÍLICA DA CASCA DO ARROZ E OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO PORTLAND PARA APLICAÇÃO EM PILARES. Engenharia Urbana em Debate. São Carlos, V4, n2, 2023. <https://doi.org/10.14244/engurbdebate.v4i2.118>



Abstract

The present study aims to investigate the dosage of high-performance concrete using rice husk silica. Two types of superplasticizer additives were evaluated: additive A and additive B. The rice husk silica used was characterized through its chemical composition by X-ray fluorescence and determination of performance index with Portland cement. The consistency of the concrete was verified through slump test. In the hardened state, tests were conducted for compressive strength, water absorption, voids index, and specific mass. With the obtained results, a statistical analysis was developed including Bootstrap confidence interval and multivariate analysis of variance (MANOVA). Comparative structural calculations were performed between the high-performance concrete with higher strength and a conventional concrete of 30 MPa, proving the viability of the produced material. Furthermore, a reduction in Portland cement consumption was observed when comparing the studied concrete categories.

Keywords: CAD; optimized consumption; Portland cement.

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un estudio sobre la dosificación de concretos de alto rendimiento utilizando sílice de la cáscara de arroz. Se evaluaron dos tipos de aditivos superplastificantes: el aditivo A y el aditivo B. La sílice de la cáscara de arroz utilizada fue caracterizada mediante su composición química por fluorescencia de rayos X y la determinación del índice de rendimiento con cemento Portland. La consistencia de los concretos se verificó mediante el ensayo de asentamiento del cono. En el estado endurecido, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión, absorción de agua, índice de vacíos y masa específica. Con los resultados obtenidos, se desarrolló un análisis estadístico que incluyó intervalo de confianza Bootstrap y análisis de varianza multivariado (MANOVA). Se realizaron cálculos estructurales comparativos entre el concreto de alto rendimiento con mayor resistencia y un concreto convencional de 30 MPa, lo que demostró la viabilidad del material producido. Además, se observó una reducción en el consumo de cemento Portland al comparar las categorías de concreto estudiadas.

Palabras clave: CAD; optimización del consumo; cemento Portland.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo. Suas propriedades permitem com que ele seja uma ótima opção para os mais variados tipos de obras. Apesar disso, o advento de edifícios cada vez mais altos e arrojados exigiu o desenvolvimento de misturas com características técnicas e econômicas superiores ao concreto convencional. Para proporcionar projetos cada vez mais desafiadores, com elevadas solicitações mecânicas, físicas e químicas, desenvolveu-se o Concreto de Alto Desempenho (CAD, ou em inglês High Performance Concrete - HPC).

O CAD é um material que apresenta seu comportamento em um patamar

bem mais elevado do que os concretos convencionais. Além de elevada resistência mecânica, ainda possui boa trabalhabilidade, qualidade estética, um bom acabamento e principalmente grande durabilidade (Tutikian, 2011). O concreto de alto desempenho veio suprir a necessidade por estruturas duráveis (Aitcin, 1998).

De maneira geral, para conseguir uma melhoria efetiva nessas propriedades do concreto, é necessário diminuir a porosidade da mistura através da redução do fator água/cimento, do diâmetro máximo dos agregados graúdos e da quantidade total de água, utilização de aditivos superplastificantes e incorporação de

adições minerais como a sílica ativa, o metacaulim ou a cinza de casca de arroz (Tutikian, 2011).

As adições minerais, podem ser utilizadas em substituição parcial ao cimento Portland, modificam as características microestruturais e as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, e elevam as características técnicas do cimento (Senff, 2010; Dal Molin, 2011).

Nesse sentido, o uso de concretos com maiores resistências, tem grande importância para a redução do consumo do cimento Portland. Enquanto um concreto de 20 MPa consome cerca de 12KG de cimento/MPa, um concreto com 50 MPa consome cerca de 6 a 8 KG de cimento/MPa, por exemplo (Ribeiro, 2021).

Hoje, no cenário mundial observam-se obras emblemáticas em CAD. Pode-se citar o edifício Burj Khalifa, que leva o título de mais alto do mundo, ostentando 828 metros de altura e 160 pavimentos. No entanto, este material ainda tem um grande potencial a ser explorado, já que seu uso se limita a obras especiais (Mehta& Monteiro, 2014).

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um CAD utilizando sílica da casca do arroz e analisar seu emprego em pilares. Os concretos produzidos foram avaliados no estado fresco e no estado endurecido. Com os resultados obtidos foi realizada uma análise estatística incluindo análise de variância multivariada (MANOVA) e intervalo de confiança Bootstrap. Por fim, foi efetuado um cálculo estrutural comparativo entre concreto de alto desempenho e concreto convencional, verificando a redução da área de concreto em

pilares e a redução de armaduras quando a seção do elemento é mantida constante, comprovando a eficácia e os benefícios de sua utilização.

2. METODOLOGIA

A metodologia para o desenvolvimento do estudo da dosagem de concretos de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz incluiu uma análise do tipo experimental, com posterior análise estatística dos resultados.

Foram realizadas duas misturas de CAD: uma delas com o aditivo A e outra com o aditivo B. Com os concretos produzidos foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas no estado fresco e no estado endurecido.

Os materiais utilizados para confecção dos concretos de alto desempenho foram: cimento Portland CPV ARI, conforme especificações da NBR 16697 (2018); areia de rio extraída da região nordeste de Santa Catarina com módulo de finura igual a 2,92; brita 0, com diâmetro máximo limitado em 9,5 mm e módulo de finura igual a 5,95; sílica ativa da casca de arroz, obtida pela queima controlada em sistema de combustão via leito fluidizado; água potável fornecida pela concessionária local e aditivos superplastificantes.

A areia e a brita foram previamente lavadas em peneiras com abertura igual a 0,3 mm e 2,36 mm, respectivamente, para remoção do material pulverulento e das partículas muito finas, com posterior secagem em temperatura ambiente. De acordo com Aitcin (1998), a remoção do material pulverulento é uma etapa importante, pois ele consome

parte da água de amassamento da mistura, prejudicando a hidratação dos componentes e a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, o que é extremamente negativo para o CAD, onde os traços já possuem quantidades de água bastante reduzidas.

Foram utilizados dois tipos de aditivos superplastificantes para a produção dos concretos: o aditivo A composto de polímeros de polietercarboxilatos e o aditivo B com composição à base de naftaleno sulfonato e resinas melamínicas.

A sílica da casca de arroz foi caracterizada através da composição química por fluorescência de raios-X (Shimadzu EDX-90) e determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias, de acordo com a NBR 5752 (2014a). Este ensaio consiste na verificação da resistência à compressão de duas argamassas: uma argamassa padrão com cimento CP II-F 32, areia normal e água; e uma argamassa com 25% de substituição em massa do cimento por sílica da casca de arroz. Foram moldados 5 corpos de prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm para cada argamassa.

Os concretos de alto desempenho foram produzidos a partir de um traço adaptado de Mehta e Monteiro (2014). A Tabela 1 apresenta a dosagem dos materiais utilizados.

A produção dos concretos foi realizada em uma betoneira de eixo inclinado, seguindo as recomendações da NBR 12821 (2009). Para cada mistura, foram moldados 8 corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Os corpos de prova foram adensados mecanicamente em uma mesa vibratória e posteriormente

curados em um tanque com água saturada de hidróxido de cálcio, a 23°C.

Com os concretos no estado fresco foi feita a análise do índice de consistência através do ensaio de abatimento de tronco de cone (Slump test), de acordo com a NBR NM 67 (1998).

No estado endurecido, foram avaliados 6 corpos de prova para determinação da resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias e 2 corpos de prova para a determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Para o ensaio de resistência à compressão foi utilizada uma prensa hidráulica com capacidade igual a 200 toneladas. Os corpos de prova foram previamente retificados e encontravam-se na condição saturada. O carregamento foi aplicado a uma taxa constante de 0,45 MPa/s até verificar a ruptura de cada amostra.

A determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica foi realizada segundo as especificações da NBR 9778 (2009).

Os resultados obtidos experimentalmente foram submetidos a análises estatísticas, incluindo análise de variância multivariada (MANOVA) e intervalo de confiança Bootstrap, realizadas com auxílio do software R (R CORE TEAM, 2017).

A MANOVA permite analisar o efeito de uma ou mais variáveis independentes na combinação linear de duas ou mais variáveis dependentes (Rahai et al., 2015). Esta análise foi utilizada para verificar o efeito significativo dos

aditivos utilizados, nos resultados de resistência à compressão aos 28 dias e de absorção de água.

O nível de significância definido para este estudo estatístico foi igual a $\alpha=0,05$. A análise da significância foi realizada com auxílio do teste de Wilks.

Para os resultados da resistência à compressão foram determinados os intervalos de confiança com auxílio da técnica de reamostragem Bootstrap. O método Bootstrap consiste na simulação de um grande número de amostras por reamostragem dos dados originais com substituições. A técnica normalmente fornece resultados mais precisos e robustos do que os métodos tradicionais (Kass et al., 2014; Di Bella et al., Izquierdo & Ramalho).

O intervalo de confiança foi definido pelo método dos percentis, com um nível de confiança de 95% e 500 reamostragens Bootstrap.

Para avaliar a aplicabilidade dos concretos de alto desempenho em pilares foi realizado um estudo comparativo entre a mistura que

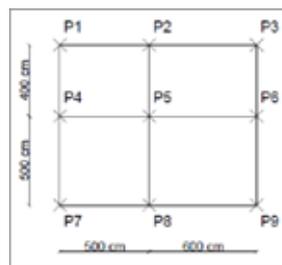
apresentou a maior resistência à compressão e um concreto convencional, com f_{ck} igual a 30 MPa.

Foram realizadas duas análises de aplicação dos concretos em pilares: na primeira análise foi considerada apenas a redução da área da seção transversal de um pilar através do emprego do CAD; e na segunda análise foi verificada a variação da taxa de armadura utilizada para os dois concretos, fixando a área da seção do pilar. Todos os cálculos foram realizados segundo a NBR 6118 (2014b).

Considerou-se um edifício com 20 pavimentos tipo, carregamento médio de 10 KN/m^2 , pé direto igual a 3 metros, vigas com dimensões de $50 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ e uma classe de agressividade ambiental do tipo II. As análises foram realizadas no pavimento mais solicitado, o pavimento térreo.

Na primeira análise, foi realizado um pré-dimensionamento da área de concreto necessária para o pilar mais solicitado, representado por P5 na Figura 1.

Figura 1- Planta baixa com a locação de pilares.



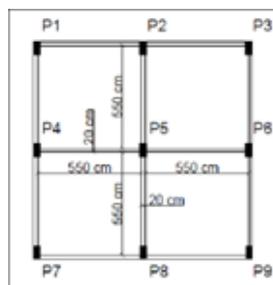
Fonte: autoria própria

A área de concreto necessária para cada material foi encontrada por meio da área de influência, através de uma estimativa de cargas.

Na segunda análise foi utilizada a planta de forma da Figura 2

para determinação das taxas de armaduras necessárias para o concreto convencional e para o concreto de alto desempenho. A dimensão do pilar P5 foi fixada em 70 cm x 35 cm.

Figura 2- Planta de forma.



Fonte: autoria própria

3 - RESULTADOS

Os resultados da composição química da cinza da casca de arroz utilizada nesta pesquisa estão apresentados na Tabela 2. Nota-se um elevado teor de dióxido de silício (SiO₂), conferindo ao material características pozolânicas, segundo Tiboni (2007).

Na Tabela 1 são indicadas as propriedades químicas exigidas para um material pozolânico, de acordo com a NBR 12653 (2014c) e a ASTM C618-17a (2017). Pode-se observar que a cinza da casca de arroz analisada atendeu todos os critérios exigidos pelas duas normas, comprovando sua pozolanicidade.

Tabela 1 - Propriedades químicas de materiais pozolânicos

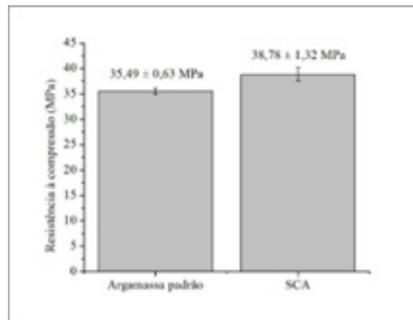
Propriedades	NBR 12653	ASTM C618-17 ^a	Sílica da casca de arroz
SiO ₂ +Al ₂ O ₂ +Fe ₂ O ₃	≥70%	≥70%	93,22%
SO ₃	≤4%	≤4%	1,29%
Teor de umidade	≤3%	≤3%	-
Perda ao fogo	≤10%	≤10%	Realizar ensaio

Fonte: autoria própria

Os valores da resistência à compressão obtidos no ensaio de índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias das argamassas padrão e das argamassas com 25% de

substituição de cinza de casca de arroz, com os respectivos erros-padrão, estão indicados na Figura 3.

Figura 3- Resultados do ensaio de determinação do índice de desempenho - cimento Portland aos 28 dias.

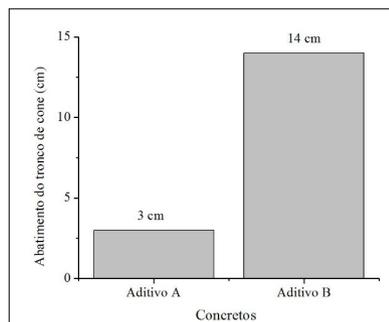


Fonte: autoria própria

O índice de desempenho da cinza da casca de arroz foi igual a 109,27%, superior ao valor mínimo de 90% estabelecido pela NBR 12653 (2014c) e ASTM C618-17a (2017). Desta forma, comprovou-se que a cinza da casca de arroz em estudo apresenta atividade pozolânica e pode ser utilizada como substituto parcial do cimento Portland.

A Figura 4 apresenta os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone dos dois concretos produzidos. É possível observar que o concreto produzido com o aditivo A não apresentou uma trabalhabilidade satisfatória, impossibilitando sua utilização em peças densamente armadas.

Figura 4- Abatimento de tronco de cone.



Fonte: autoria própria

Além disso, a dosagem dos materiais apresentada na Tabela 2 mostra que essa mistura já havia requerido mais água do que a segunda, confirmando o baixo rendimento do aditivo A.

Tabela 2 - Dosagem dos materiais - confecção do CAD

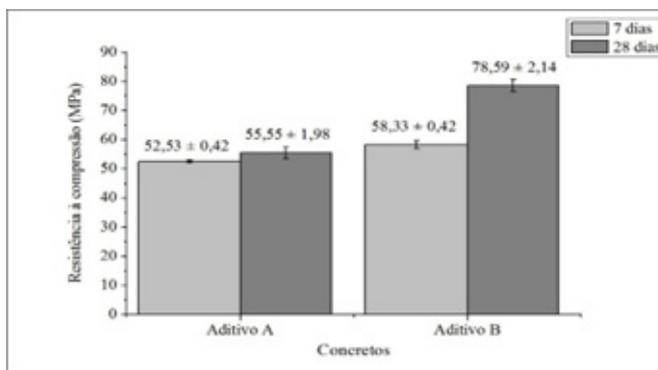
Kg	Concreto A	Concreto B
Cimento Portland CP-V	10,227	10,227
Sílica da casca do arroz	0,987	0,987
Agregado Graúdo (dm máx: 9,5 mm)	22,428	22,582
Agregado Miúdo	14,196	14,118
Água Total	3,955	3,177
Relação água/ materiais cimentícios	0,35	0,29

Fonte: autoria própria

Por outro lado, a mistura com o aditivo B apresentou uma trabalhabilidade adequada, possibilitando a utilização deste concreto em peças com maior densidade de armaduras.

A Figura 5 apresenta os resultados da resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias.

Figura 5- Resistência à compressão aos 7 e 28 dias.



Fonte: autoria própria

Observa-se que os resultados da resistência à compressão do concreto produzido com o aditivo B foram significativamente superiores aos resultados obtidos com o aditivo A. Isso está possivelmente associado com a quantidade maior de água requerida pela mistura A e o melhor desempenho do aditivo B, tanto na propriedade de resistência à compressão quanto no abatimento do tronco de cone.

É possível notar também que o concreto A não apresentou uma diferença significativa na resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias. O valor aos 7 dias foi igual a 95% do valor obtido aos 28 dias. Segundo a NBR 6118 (2014b), a resistência à compressão com a idade de 7 dias foi aproximadamente 82% da resistência com 28 dias. Sendo assim, era esperado um aumento mais significativo do que o ocorrido. Esse fato pode indicar uma incompatibilidade do aditivo A com o cimento utilizado (CPV ARI).

Para a mistura com aditivo B os resultados foram satisfatórios. Os corpos de prova alcançaram com 7 dias uma resistência média igual a 75% do valor com 28 dias e apresentaram um aumento de resistência superior ao definido pela norma (NBR 6118, 2014b). Esse crescimento pode ser

justificado pela presença de um material pozzolânico - a cinza da casca de arroz, que transforma o hidróxido de cálcio (C-H) proveniente da hidratação do cimento Portland em silicato de cálcio hidratado (C-S-H), e resulta no aumento da resistência à compressão do concreto em idades avançadas (ASTM C618-17a, 2017). Em ambas as misturas, a elevada carga aplicada no ensaio de resistência à compressão fez com que os corpos de prova produzidos entrassem em colapso quando rompidos no ensaio de resistência à compressão. Ressalta-se que para o concreto comum não é visto esse colapso, esporadicamente observam-se apenas algumas trincas.

A Tabela 3 mostra os valores obtidos para absorção de água, índice de vazios e massa específica dos dois concretos.

Tabela 3- Absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos produzidos

Propriedades	Aditivo A			Aditivo B		
	A.A.	I.V.	M.E.	A.A. (%)	I.V. (%)	M.E.
	(%)	(%)	(g/cm ³)			(g/cm ³)
CP1	3,73	8,88	2,38	2,27	5,54	2,44
CP2	4,14	9,84	2,38	2,70	6,51	2,41
Média ±	3,94 ±	9,36 ±	2,38 ±	2,49 ±	6,02 ±	2,43 ±
Erro padrão	0,21	0,48	0,00	0,21	0,48	0,01

SIGLAS:

A.A: Absorção de água;

I.V: Índice de vazios;

M.E: Massa específica.

Fonte: autoria própria

Comparando o índice de vazios das misturas A e B, observou-se que a média da mistura B foi 35,63% inferior a da mistura A. Sabe-se que a relação água/cimento possui papel fundamental no índice de vazios presentes na mistura, e que quando aumentado esse fator, tem-se uma porcentagem maior de vazios (Aitcin, 1998).

Além disso, comparando os valores de índice de vazios encontrados nesse trabalho com um estudo realizado por Izquierdo (2016), onde foram obtidos índices de 13,7% e 12,8% para concretos comuns com fck de 20 e 40 MPa respectivamente, pode-se notar uma redução significativa do índice de vazios do CAD quando comparado ao concreto convencional. Essa menor ocorrência de vazios proporciona propriedades de alto desempenho à pasta, assim como elevada resistência mecânica para as misturas. As adições minerais, por apresentarem elevada finura, colaboram para a mitigação dos vazios do concreto. Dessa forma, possivelmente a adição da cinza de casca de arroz utilizada nas misturas contribuiu para que a porosidade do concreto fosse reduzida significativamente (Mehta

& Monteiro, 2014). Com relação à absorção de água e porosidade, os dois concretos apresentaram valores bem reduzidos. A mistura B por apresentar um índice de vazios menor que a mistura A, obteve uma massa específica maior.

Com relação à análise estatística, a MANOVA relacionando o efeito do aditivo nas variáveis dependentes de absorção de água e resistência à compressão está apresentada na Tabela 4.

Os resultados indicam que não há uma diferença significativa nas variáveis de absorção de água e resistência à compressão devido ao tipo de aditivo utilizado na produção dos concretos de alto desempenho (p -valor > 0,05).

Os dados analisados apresentaram distribuição normal, verificada por meio do teste de Shapiro (p -valor > 0,05), e variância constante.

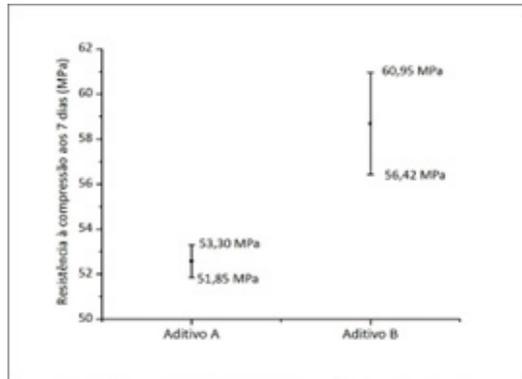
Os intervalos de confiança Bootstrap de 95% para as resistências aos 7 dias e 28 dias estão apresentados nas Figura 6 e 7.

Tabela 4- Análise de variância multivariada (MANOVA)

Propriedades	G. L.	Estat. Wilks	Estat. F	G.L. Numerador	G.L. Denominador	p-valor
Aditivo	1	0,032093	15,08			0,1791
Resíduos	2	-	-	-	-	-

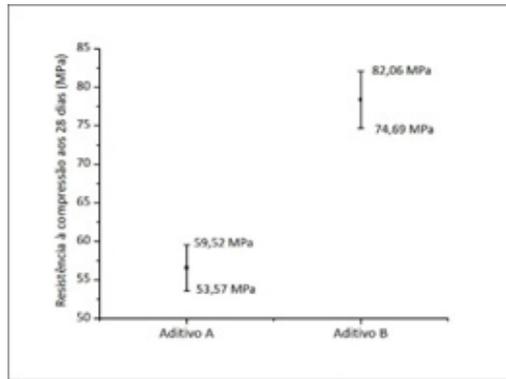
Fonte: autoria própria

Figura 6- Intervalo de confiança Bootstrap de 95% para a resistência à compressão aos 7 dias.



Fonte: autoria própria

Figura 7- Intervalo de confiança Bootstrap de 95% para a resistência à compressão aos 28 dias.



Fonte: autoria própria

Observa-se que os intervalos obtidos para os dois concretos não se sobrepõem em nenhum ponto. Nas duas idades o limite inferior da resistência à compressão do aditivo B foi maior que ao limite superior obtido com o aditivo

A. Isso mostra que a resistência à compressão do aditivo B é consideravelmente superior aos valores obtidos com o aditivo A.

O concreto de alto desempenho

selecionado para o dimensionamento da seção transversal do pilar e determinação da taxa de armadura foi o concreto produzido com o aditivo B. A resistência característica adotada foi igual a 80 MPa, valor inteiro mais próximo da resistência à compressão média obtida aos 28 dias, $78,59 \pm 2,14$ MPa. Para o dimensionamento da área do pilar P5, os valores obtidos para os dois concretos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores obtidos para a área de concreto utilizada em P5.

Fck (Mpa)	Área de concreto necessária (cm ²)
30	5821
80	2183

Fonte: autoria própria

Observou-se uma considerável redução na seção do pilar utilizando o concreto de maior resistência. A seção transversal calculada para o CAD é 2,67 vezes inferior à seção do concreto convencional. Isso indica que à medida que o fck aumenta, a área de concreto necessária diminui na mesma proporção.

A Tabela 6 apresenta os valores da quantidade de armadura necessária para os dois tipos de concreto, apresentando também a área mínima e máxima estipulada por norma para a seção estudada do pilar P5 (70 cm x 35 cm).

Tabela 6- Área de aço calculada para o pilar P5.

Fck	Área de concreto necessária (cm ²)
30 MPa	120,75
80 MPa	12,88
Armadura mínima	31,38
Armadura máxima	196

Fonte: autoria própria

Vale ressaltar que, como a área calculada para o concreto de 80 MPa ficou abaixo do mínimo estipulado por norma, adota-se a área mínima para a taxa de armadura deste pilar. Mesmo adotando a área mínima, verificou-se uma redução de 3,84 vezes na armadura com o uso do CAD em relação ao concreto convencional, mostrando a alta economia desse concreto especial.

redução do consumo fica em torno de 33%.

Além disso, percebe-se que a utilização de um concreto de 30 MPa para o pilar em estudo resultou em uma taxa de armadura muito elevada, o que torna sua construção inviável, mesmo que o valor calculado esteja abaixo do valor máximo estipulado por norma.

Dessa análise, é possível observar ainda, a redução expressiva no consumo de cimento Portland. Embora o Cad possua maior solicitação desse material, quando relacionamos a resistência mecânica à compressão com a redução de consumo de concreto no CAD, a

Através das duas análises pode-se comprovar que a utilização de concretos de alto desempenho em pilares de concreto armado contribui para diminuir consideravelmente o consumo de concreto através da redução da seção transversal de pilares.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

- A cinza da casca de arroz utilizada na confecção dos concretos de alto desempenho apresentou um elevado índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, e classificou o material como pozolânico, o que resulta em uma grande reatividade para a pasta cimentícia.

- Comparando os dois aditivos utilizados, o aditivo B apresentou um melhor desempenho, tanto na propriedade de abatimento de tronco de cone quanto na resistência à compressão.

- Nos ensaios de determinação da absorção de água e índice de vazios, o concreto de alto desempenho apresentou valores baixos, o que confere ao material uma elevada resistência mecânica e uma ótima aplicação em concreto armado, onde se deseja limitar ao máximo a penetração de agentes nocivos, que possam atingir a armadura e danificá-la.

- A MANOVA mostrou que não há uma diferença significativa nas variáveis de absorção de água e resistência à compressão devido ao tipo de aditivo utilizado na produção dos concretos de alto desempenho.

- A construção de intervalos de confiança com o método de Bootstrap comprovou que a resistência à compressão do aditivo B é consideravelmente superior aos valores obtidos com o aditivo A.

- Os cálculos estruturais comparativos comprovaram as vantagens técnicas e econômicas do CAD. A redução da área de concreto com o CAD foi bem

significativa, bem como a diminuição da taxa de armadura necessária, comprovando a aplicabilidade do concreto de alto desempenho em pilares.

- Para os cálculos estruturais comparativos, concluiu-se um rendimento largamente maior do CAD. Os resultados obtidos no cálculo para a área de concreto utilizada, mostraram que à medida que é aumentado o f_{ck} , tem-se uma diminuição na mesma ordem para a área de concreto. Ou seja, o f_{ck} e a área da seção do pilar apresentaram uma relação inversamente proporcional. Com isso, também foi possível quantificar a redução no consumo de cimento final, em cerca de 33%. Apesar de o CAD possuir maiores teores de cimento Portland, na mistura, com a redução da seção, os materiais totais são empregados em menores quantidades quando comparados ao concreto convencional.

REFERÊNCIAS

AÏTCIN, Pierre-Claude. *Concreto de Alto Desempenho*. São Paulo: Pini, 1998. 667 p. Tradução de Geraldo G. Serra.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2014c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório-procedimentos*. Rio de Janeiro, 2009.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 16697: Cimento Portland – requisitos*. Rio de Janeiro, 2018. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, 1998
- NBR NM 79: Preparação de concreto em laboratório*. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS - ABNT. *NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS - ABNT. *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpo-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2001b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias*. Rio de Janeiro, 2014a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 2009.
- ASTM COMMITTEE C-09 ON CONCRETE AND CONCRETE AGGREGATES. *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. ASTM international, 2017.
- DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Adições Mineraias. In: ISAIA, Geraldo Cechella. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 8. p. 261-305. 1v.
- DI BELLA, C. WRYZKOWSKI, M.; LURA, P. *Materials and Structures*, v. 50-52, 2016; p. 1-13.
- IZQUIERDO, S. I.; RAMALHO, M. A. *Use of residual powder obtained from organic waste to partially replace cement in concrete*. *Dyna*, v. 83, n. 195, 2016; p. 147-155.
- KASS, R. E.; EDEN, U. T.; BROWN, E. N. *Analysis of neural data*. New York: SPRINGER, 2014.
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.
- R CORE TEAM R. A language and environment for statistical computing. Versão 3.4.2 R Foundation for Statistical Computing Vienna, Austria, 2010.
- RAHAI, A.; DOLATI, A.; KAMEL, M. E. Studying the effect of various parameters on mechanical properties of lightweight aggregate concrete using MANOVA. *Materials and Structures*, v. 48, n. 1, 2015; p. 2353-2365.

- RIBEIRO, Daniel Véras. *Princípios da ciência dos materiais cimentícios: produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos*. Editora Appris, 2021.
- ROSSIGNOLO, J. A. Avaliação da zona de transição interfacial pasta-agregado leve em concretos com sílica ativa e látex SBR. *Revista Matéria*, v. 12, n. 3, p. 532-540, 2007.
- SEFFF, L.; HOTZA, D.; REPETTE, W. L. Comportamento reológico de pastas de cimento com adição de sílica ativa, nanossílica e dispersante policarboxílico. *Revista Matéria*, Florianópolis, v. 15, n. 1, p.012-020, 2010.
- SJOSTROM, C. Durability and sustainable use of building materials. In: LLEWELLY, J. W.; DAVIES, H. LLEWELLY, J. W.; DAVIES, H. *Sustainable of materials*. 1. Ed. Londres (Inglaterra): RILEM. 1992. p.129-153.
- TÉCHNE. *Concreto de alto desempenho com adições minerais e químicas*. Brasil: Pini, v. 1, n. 163, dez. 2010. Mensal.
- TIBONI, R. *A utilização da cinza da casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos a base de cimento Portland*, São Paulo, 2007, Dissertação (mestrado) - Universidade de São Paulo, 196 p.
- TUTIKIAN, Bernardo F.; ISAIA, Geraldo Cechella; HELENE, Paulo. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, Geraldo Cechella. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 36. p. 1282-1322. 2v.