

AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS COMO MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS SUSTENTÁVEIS

Leticia Cardoso Gamba¹
Cleudson Rosa Alves²

Resumo

A produção de cimento Portland é uma fonte expressiva de emissões de CO₂, pesquisas indicam que aproximadamente 7% das emissões globais podem ser atribuídas ao setor de produção de cimento Portland. Esta indicação levou as empresas a buscarem práticas mais sustentáveis, incluindo a incorporação de subprodutos industriais, tais como materiais cimentícios suplementares. O presente estudo explora três resíduos: resíduo de polimento de porcelanato (RPP), cinza de casca de arroz (CCA) e cinza volante (CV), como substitutos parciais do cimento Portland. Foram analisadas as propriedades dos materiais, características físicas e resistência à compressão do concreto, com o intuito de identificar sua proporção ótima entre resíduo e cimento. A substituição do cimento pelo material suplementar foi nas proporções de 10%, 20% e 30% de cada resíduo. As avaliações abrangeram trabalhabilidade, resistência à compressão aos 28 dias, densidade, absorção de água e porosidade. Com resultados divergentes para cada resíduo, verificou-se que a cinza volante apresentou os melhores resultados quanto a resistência mecânica, sendo que até o teor de 20% de substituição, pode ocorrer um aumento de até 6% na resistência à compressão, sem afetar sua trabalhabilidade e demais propriedades. Já o resíduo de polimento de porcelanato, devido as suas características como finura, densificou mais o concreto, reduzindo sua absorção de água, porém apresentou resultados inferiores quanto a trabalhabilidade. Na cinza de casca de arroz, a substituição ideal foi de 10%, evidenciando aumento na resistência, densidade e porosidade, mas com impacto na trabalhabilidade. Os resultados apresentados mostram que é necessária uma dosagem específica para cada resíduo, não existindo uma dosagem única para produção de cimento com material suplementar. No entanto, a viabilidade da substituição desses resíduos no concreto permanece, desde que se adote uma abordagem personalizada.

Palavras-Chave: Concreto sustentável. Cimentos suplementares. Cinza de casca de arroz. Resíduo de polimento de porcelanato. Cinza volante.

¹ Acadêmica do Curso de Graduação em Engenharia Civil, no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). E-mail: leticia.cg@aluno.ifsc.edu.br.

² Professor do Curso de Graduação em Engenharia Civil, no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). E-mail: cleudson.alves@ifsc.edu.br.

EVALUATION OF THE USE OF INDUSTRIAL WASTES AS SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIALS IN THE PRODUCTION OF SUSTAINABLE CONCRETES

Abstract

The production of Portland cement is a significant source of CO₂ emissions; research indicates that approximately 7% of global emissions can be attributed to the Portland cement production sector. This realization has prompted companies to seek more sustainable practices, including the incorporation of industrial by-products such as supplementary cementitious materials. This study explores three waste materials: porcelain tile polishing residue (PPR), rice husk ash (RHA), and fly ash (FA), as partial substitutes for Portland cement. The properties of the materials, physical characteristics, and compressive strength of concrete were analyzed to identify the optimal ratio between waste and cement. Cement replacement with the supplementary material was done at proportions of 10%, 20%, and 30% for each waste. Evaluations covered workability, compressive strength at 28 days, density, water absorption, and porosity. With divergent results for each waste, it was found that fly ash exhibited the best mechanical strength outcomes. Up to a 20% substitution rate, there could be an increase of up to 6% in compressive strength without affecting workability and other properties. Porcelain tile polishing residue, due to its fineness, densified the concrete, reducing water absorption but showed inferior workability results. In the case of rice husk ash, the ideal substitution rate was 10%, indicating an increase in strength, density, and porosity but with an impact on workability. The results demonstrate the need for specific dosage for each waste, as there is no one-size-fits-all dosage for the production of cement with supplementary material. However, the feasibility of substituting these wastes in concrete remains, provided a personalized approach is adopted.

Keywords: Sustainable concrete. Supplementary cements. Rice husk ash. Porcelain polishing residue. Fly ash.

1. INTRODUÇÃO

A indústria de produção de cimento é reconhecida como uma das principais fontes industriais de emissões de gases de efeito estufa, com ênfase particular, no dióxido de carbono (CO₂) (WORRELL *et al*, 2001). Essas emissões derivam principalmente, do processo de calcinação do calcário, da queima de combustíveis e da geração de energia durante a produção de cimento (MADDALENA; ROBERTS; HAMILTON, 2018).

Conforme G. Habert *et al* (2020), o consumo preponderante de cimento Portland está associado à produção de concreto, que é o material manufaturado mais utilizado na indústria da construção. Pesquisas indicam que aproximadamente

7% das emissões globais de CO₂ podem ser atribuídas à produção de cimento Portland (DAMINELI *et al*, 2010).

Em 2018, a indústria cimenteira lançou na atmosfera cerca de 1,5 Gt de CO₂, o equivalente a cerca de 4% das emissões provenientes de combustíveis fósseis (ANDREW, 2019). Esse panorama contribui para o aparecimento de diversos problemas, incluindo a exaustão de recursos naturais e o agravamento das emissões globais de gases de efeito estufa.

Para abordar esse desafio, as empresas do setor têm implementado medidas e adotado tecnologias mais sustentáveis, como a incorporação de subprodutos industriais, como materiais cimentícios suplementares (MCSs), notavelmente, a escória de alto-forno e a cinza volante (FADINI NATALLI *et al*, 2021). No entanto, a geração desses resíduos é limitada em todo o país. Outros resíduos, como bagaço de cana-de-açúcar e cinza de casca de arroz possuem um expressivo potencial para o seu emprego como MCSs, mas a sua exploração é ainda limitada (SIDDIKA *et al*, 2021).

Considerando que a disponibilidade local de cada resíduo exerce influência substancial na viabilidade de sua utilização, aliada aos custos e impactos ambientais relacionados ao transporte, torna-se essencial investigar a logística da utilização de resíduos na construção civil. Nesse contexto, a região sul brasileira se destaca em vários segmentos da cadeia produtiva nacional, incluindo a produção de arroz, a indústria cerâmica e a geração energia térmica, por meio do carvão mineral.

Nas últimas duas décadas, observa-se um notório aumento no número de pesquisas relacionadas à incorporação de resíduos no concreto, sobretudo, como carga material de classe pozolânica (DAMINELI *et al*, 2010; HABERT *et al*, 2020; WORRELL *et al*, 2001). Dentre as diferentes categorias de resíduos, os resíduos sólidos, como os materiais pozolânicos têm se destacado. Portanto, é objetivo da comunidade científica, promover a utilização desses materiais, como forma de mitigar o impacto ambiental das emissões de CO₂ decorrentes da produção de cimento.

Neste sentido, três tipos de resíduos são objeto de extensa pesquisa, como substitutos parciais do cimento Portland: resíduo de polimento de porcelanato (RPP), cinza de casca de arroz (CCA) e cinza volante (CV) oriunda da queima de carvão mineral.

A cinza proveniente da queima da casca de arroz, um subproduto empregado

como fonte energética, apresenta potencial reativo pozolânico substancial devido à sua composição química, que contém até 70% de SiO_2 (CHALEE *et al*, 2013).

Pesquisas demonstraram que a utilização de cinza de casca de arroz moída, resultando em um material pozolânico reativo, com distribuição de tamanho de partícula similar ao cimento Portland tipo I, e atuando como substituto do cimento em proporções de 10% a 20%, apresentam aumento na resistência à compressão de até 10% aos 28 dias (PEDROZO, 2008).

Adicionalmente, W. Chalee *et al* (2013) identificaram que a aplicação de cinza de casca de arroz finamente moída, com uma quantidade negligenciável de partículas retidas, em uma peneira de 45 μm (inferior a 2%), para substituir até 30% do peso do ligante de cimento Portland, pode conduzir à produção de concreto de elevada resistência.

Outro subproduto de destaque são as cinzas volantes, resultantes da queima de carvão em usinas termelétricas, que têm se consolidado como um dos suplementos mais estudados e amplamente utilizado, em substituição ao clínquer Portland (GIERGICZNY, 2019). De acordo com Ricardo Junckes (2015), na indústria de concreto atual, a substituição do cimento por cinzas volantes em concretos, geralmente varia de 15% a 25%, podendo chegar a 30% a 35%, em aplicações específicas.

A incorporação de cinzas volantes à mistura de concreto aprimora a trabalhabilidade, graças ao formato esférico das partículas presentes nessas cinzas (SIDERIS *et al*, 2018). Registra-se que a presença de cinzas volantes no concreto contribui para reduzir a segregação dos materiais (SIDERIS *et al*, 2018).

Evidencia-se que a cinza volante reage com o hidróxido de cálcio liberado, durante a hidratação do cimento Portland, formando compostos com propriedades cimentantes e contribuindo, para o aumento significativo, na resistência mecânica do concreto ao longo do tempo (HOPPE FILHO, 2008). Acrescenta-se que a reação pozolânica das cinzas volantes também contribui na densificação da estrutura porosa dos materiais à base de cimento, resultando em uma considerável redução da permeabilidade, aumentando o desempenho e vida útil do concreto (MARSH, DAY e BONNER, 1985).

Neste sentido, outro resíduo analisado neste estudo, é o resíduo de polimento de porcelanato (RPP), um subproduto gerado no processo de fabricação de porcelanatos. A produção de um metro quadrado de porcelanato resulta em cerca de

100g de RPP (JACOBY; PELISSER, 2015). Esse material consiste, principalmente de SiO_2 (60-70%) e Al_2O_3 (15-20%), com um diâmetro médio de partícula entre 7 e 10 μm . A composição química e a finura conferem ao RPP, um grande potencial como material pozolânico.

De fato, algumas investigações validaram a viabilidade da utilização do RPP, como suplemento cimentício em pastas de cimento Portland (ANDREOLA *et al*, 2010), argamassas e concretos (PELISSER, STEINER e BERNARDIN, 2012).

Diversas pesquisas têm evidenciado a viabilidade do aproveitamento de resíduos industriais, em substituição ao cimento e, nos últimos 20 anos, esse tema vem sendo cada vez mais explorado, especialmente na incorporação de resíduos sólidos no concreto.

Nesta perspectiva, esta proposta de estudo busca ampliar o conhecimento sobre o assunto, com uma abordagem pouco utilizada até o momento, analisando de forma conjunta três tipos de resíduos: resíduo de polimento de porcelanato (RPP), cinza de casca de arroz (CCA) e cinza volante (CV), proveniente da queima de carvão mineral, como substitutos parciais do cimento Portland.

Objetiva-se uma abordagem comparativa, com foco na sustentabilidade e na substituição do cimento, controlando e reduzindo o consumo de clínquer, que diminui as emissões de carbono na produção do cimento e, conseqüentemente, promove ganhos ambientais significativos.

Para tanto, esta pesquisa pretende analisar as propriedades físicas e químicas dos materiais cimentícios, propriedades físicas do concreto (consistência, densidade aparente, porosidade e absorção de água) e resistência à compressão, a fim de determinar uma proporção ótima entre resíduo e cimento. Os resultados obtidos para cada tipo de resíduo foram comparados entre si, visando elucidar essas questões para dar respostas à comunidade técnica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O texto a seguir descreve os materiais utilizados e os métodos empregados neste estudo.

2.1 Materiais

O cimento utilizado foi o CP V-ARI RS, da marca Votoran, comercializado como cura ultrarrápida. A tabela 1, apresenta a composição química obtida por fluorescência de raios X do produto obtido, em trabalho anterior.

Tabela 1 - Composição Química do Cimento CP V-ARI RS utilizado

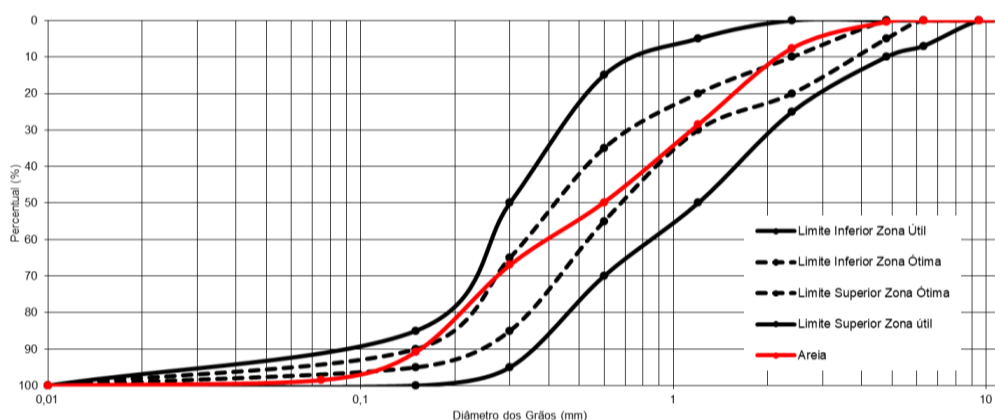
Elementos	Teor (%)
CaO	58,513
SiO ₂	19,137
MgO	5,049
Al ₂ O ₃	4,255
SO ₃	3,956
Fe ₂ O ₃	3,652
K ₂ O	0,858
TiO ₂	0,352
SrO	0,104
ZnO	0,035
CuO	0,019
P.F.	4,07

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Os agregados utilizados nesta pesquisa compreenderam tanto os miúdos quanto os grãos, originados de extração local (sul de Santa Catarina). A areia, de granulometria média, passou por um processo de secagem, em estufa a 110 °C, durante o período de 24 horas. A brita #1 (9,5-19mm) foi utilizada previamente seca.

A curva granulométrica do agregado miúdo, resultante da classificação por peneiramento, realizada conforme a NBR 17054:2022, está representada na figura 1. Nela revela-se que a distribuição das partículas do agregado abrange toda faixa utilizável, com uma porção significativa, situando-se na zona ótima, conforme especificado, na NBR 7211:2022.

Figura 1 - Curva Granulométrica do Agregado Miúdo



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Por meio do mesmo ensaio se obtiveram os dados referentes ao módulo de finura e ao diâmetro máximo característico do agregado miúdo, esses apresentados na tabela 2.

De acordo com os resultados, conclui-se que o agregado em utilização se enquadra na faixa ótima, conforme a NBR 7211:2022, que define a faixa ideal para o módulo de finura, variando de 2,20 a 2,90.

Tabela 2 - Características do Agregado Miúdo

Agregado Miúdo	
Módulo de finura	2,44
Dimensão máxima	4,8 mm

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

A Cinza de Casca de Arroz (CCA) foi obtida com uma empresa de alimentos da cidade de Araranguá (Santa Catarina), a Cinza Volante (CV), foi fornecida por um complexo termelétrico, localizado em Capivari de Baixo (Santa Catarina), sendo previamente secas, em estufa a 110°C, durante 24 horas.

Em seguida, submeteu-se a uma moagem de 15 minutos, em um moinho de bolas planetário, da marca SERVITECH, com rotação de 400 rpm, a fim de reduzir o diâmetro médio de partícula.

Já o RPP, oriundo de uma indústria cerâmica localizada na cidade de Cocal do Sul (Santa Catarina) apresentava-se inicialmente, úmido e aglomerado, em torrões.

Para sua preparação, foi submetido ao processo de secagem, semelhante aos outros resíduos, seguido da desagregação dos torrões.

Em seguida, foi submetido ao mesmo moinho de bolas planetário, por 5 minutos, com o propósito de homogeneizar as partículas.

Foi empregado também, o aditivo Liga Flow 47, da empresa Liga Química, que é um superplastificante à base de Policarboxilato, com densidade igual a 1,07 g/cm³.

2.1 Caracterizações dos materiais

Para a caracterização dos materiais, foram feitos ensaios de massa específica aparente dos agregados e granulometria. A seguir serão descritas as normas em vigor, para cada ensaio.

2.2.1 Massa específica aparente dos agregados

A determinação da massa específica dos agregados recorreu às normas técnicas pertinentes. Para o agregado miúdo, a NBR NM 52:2009: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. A massa específica do agregado graúdo foi adotada a NBR NM 53:2009: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.

Os resultados do ensaio de massa específica aparente, realizado para os agregados são expressos e podem ser observados na tabela 2 a seguir:

Tabela 3 - Massa Específica dos Agregados

Material	Massa Específica
Agregado Miúdo	1,56 g/cm ³
Agregado Graúdo	1,51 g/cm ³

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

2.2.2 Granulometria

Conforme a NBR 17054:2022, o procedimento envolveu a secagem dos agregados em uma estufa, com temperatura constante de 110°C, pelo período de 24

horas. Posteriormente, a amostra passou pelo processo de peneiramento, começando com a peneira de maior abertura e progredindo para as de aberturas menores. A cada etapa do peneiramento, as partículas retidas, em cada peneira, foram pesadas de forma individual.

A partir das massas retidas, em cada peneira e da massa total da amostra, foi realizado o cálculo da porcentagem de material retido em cada faixa de tamanho. Esse procedimento possibilitou a construção da curva granulométrica, que representa a distribuição das partículas na amostra.

A fim de definir o diâmetro médio das partículas da CCA, CV, RPP e do CP V-ARI RS, foi realizado o ensaio de granulometria a laser, em meio líquido, utilizando um analisador de partículas a laser, do modelo CILAS 1064.

2.3 Dosagem do concreto

Inicialmente, foi realizada uma curva de dosagem do traço de referência sem utilização de resíduo para determinar o teor ideal de aditivo e a relação água cimento (a/c) ideal.

Com base no material de referência (traço sem substituição do cimento Portland), determinou-se que a relação água cimento inicial, de 0,45, e o percentual de aditivo ótimo, ficou em 0,45%, em relação à massa de cimento. O traço utilizado foi determinado previamente, verificando-se que o teor de argamassa ideal para o traço da referência seria de 1:2,24:2,76:0,45:0,45 (cimento, areia, brita, água, aditivo), sendo que neste traço o ensaio de abatimento obteve o valor de 12cm, resultado desejável para um concreto convencional.

2.3.2 Determinação do traço com a incorporação dos resíduos

Após determinado o traço de referência, foram propostos três percentuais de substituição ao cimento. Para cada resíduo proposto, foram realizadas substituições de 10%, 20% e 30% em massa. Para os percentuais de resíduos verificou-se que o traço de referência não estava adequado para a CCA e RPP, em termos de consistência. Realizou-se o ajuste na dosagem, alterando a relação água cimento para 0,50 e percentual de aditivo também para 0,50%, em relação à massa de cimento para o CCA, e relação a/c de 0,45% e percentual de aditivo de 0,50%, em

relação à massa de cimento para o RPP, conforme apresentado na tabela 3.

Tabela 4 - Traços do Concreto Resultantes

Traço	Cimento (%)	RPP (%)	CV (%)	CCA (%)	Água	Aditivo
REF	100	0	0	0	0,45	0,45%
RPP10	90	10	0	0	0,45	0,50%
RPP20	80	20	0	0	0,45	0,50%
RPP30	70	30	0	0	0,45	0,50%
CV10	90	0	10	0	0,45	0,45%
CV20	80	0	20	0	0,45	0,45%
CV30	70	0	30	0	0,45	0,45%
CCA10	90	0	0	10	0,50	0,50%
CCA20	80	0	0	20	0,50	0,50%
CCA30	70	0	0	30	0,50	0,50%

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

2.4 Moldagem e Cura

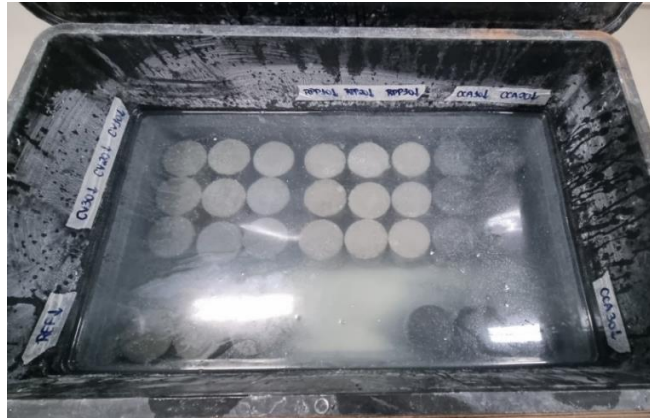
Quanto à composição do concreto, os materiais foram submetidos ao processo de pesagem que seguiram a proporção estabelecida em cada traço.

A mistura dos materiais foi realizada em um misturador, da marca CONTENCO (PAVITEST - 335), com sequência específica: o agregado graúdo, cimento, resíduo e a água com a presença do aditivo, foram inicialmente adicionados e misturados, por 30 segundos, seguidos pela inclusão do agregado miúdo, com mistura adicional de 2 minutos e 30 segundos, totalizando 3 minutos de mistura.

Foram produzidos três corpos de prova para cada composição de concreto. A moldagem dos corpos de prova seguiu as orientações estabelecidas pela norma NBR 5738:2015. Os moldes empregados, com dimensões de 20 cm de altura por 10 cm de diâmetro, foram lubrificados para facilitar o processo de desmoldagem e preenchidos em três camadas, sendo adequadamente adensados.

Após a moldagem, o concreto foi deixado em repouso, em temperatura ambiente, por aproximadamente 72 horas. Passado esse período, os corpos de prova foram retirados dos moldes e submetidos ao processo de cura por imersão, em recipiente com capacidade de 200 litros, até os 28 dias, como mostra a figura a seguir:

Figura 2 - Cura por Imersão dos CPs



Fonte: Acervo da autora, 2023.

2.5 Ensaio no Estado Fresco

No estado fresco, foi conduzido o ensaio de abatimento do tronco de cone, comumente conhecido como, *Slump Test*, para medir a consistência do concreto, seguindo os procedimentos da NBR 16889:2020: Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

O molde utilizado neste ensaio, assume a forma tronco-cônica, com um diâmetro variando de 100 mm a 200 mm e uma altura de 30 cm, conforme apresentado na figura 2.

Figura 3 - Ensaio de Abatimento



Fonte: Acervo da autora, 2023.

2.6 Ensaio no Estado Endurecido

No estado endurecido foram realizados ensaios de resistência à compressão,

densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta. As normas específicas e em vigência para cada ensaio, seguem detalhadas:

2.6.1 Resistência à compressão

Após o período de 28 dias de cura do concreto, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, em máquina universal de ensaios da marca EMIC, com capacidade de 2000 kN, localizada nas instalações do laboratório estruturas do IFSC, em Criciúma, seguindo as orientações estabelecidas na NBR 5739:2018, conforme a figura abaixo:

Figura 4 - Máquina Universal de Ensaios



Fonte: Acervo da autora, 2023.

2.6.2 Determinação da densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água

A determinação da densidade aparente, porosidade e absorção de água do concreto foram feitas seguindo os procedimentos da NBR 9778:2005: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Depois do rompimento dos corpos de prova, para o ensaio de resistência à compressão, os seus testemunhos foram submetidos ao processo de secagem, em estufa, a 110°C, por 72h, para determinação da massa seca da amostra.

Em seguida, foram imersos em água à temperatura ambiente, durante 72h, e pesados, utilizando uma balança hidrostática, para a determinação da massa submersa em água.

Na sequência, as amostras foram superficialmente secas, com pano e pesadas para determinar a massa saturada, com superfície seca.

A determinação da densidade aparente, porosidade e absorção de água do concreto foram realizadas, por meio de cálculos de acordo com as equações 1, 2 e 3.

$$\text{Absorção de água} = \frac{M_{sss} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Densidade Aparente} = \frac{M_s}{M_{sss} - M_i} \quad (2)$$

$$\text{Porosidade Aberta} = \frac{M_{sss} - M_s}{M_{sss} - M_i} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

M_{sss} = Massa saturada com superfície seca (g)

M_s = Massa seca em estufa (g)

M_i = Massa imersa *em* água (g)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados alcançados com o estudo seguem abaixo apresentados, descritos, discutidos e analisados.

3.1 Caracterização dos Materiais

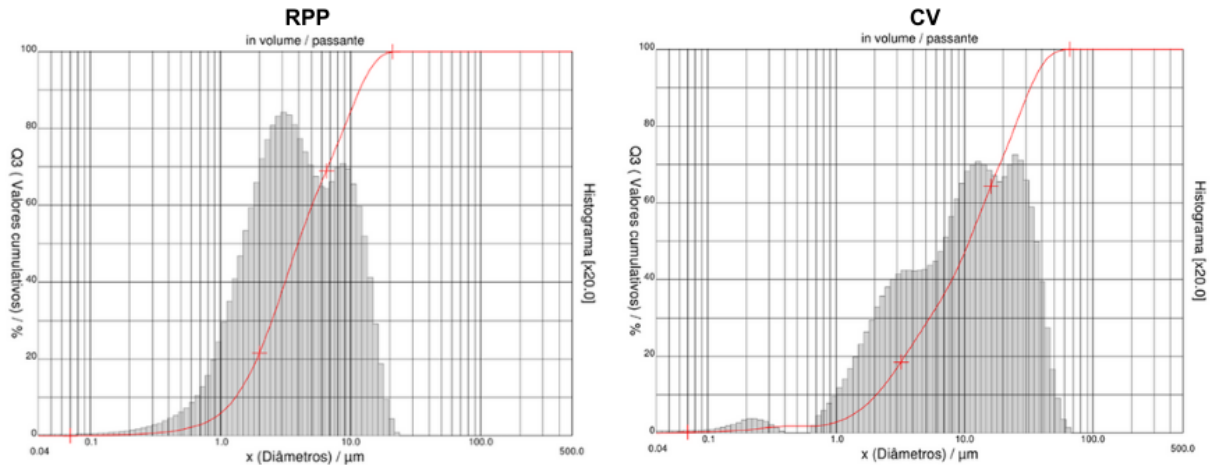
Os resultados da caracterização dos materiais se encontram abaixo expostos:

3.1.1 Granulometria

O ensaio de granulometria a laser forneceu os resultados dos resíduos

industriais e do CP V-ARI RS, a seguir representados nas figuras 5, 6 e na tabela 4.

Figura 5 - Curva Granulométrica do RPP e do CV



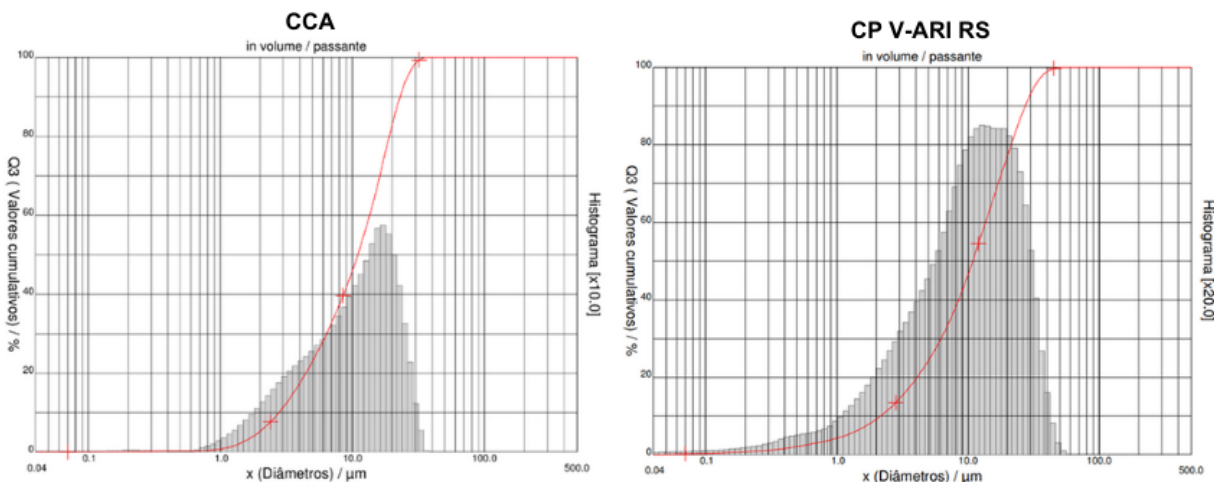
Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

O Figura 5 ilustra de forma objetiva, a distribuição granulométrica da CV, evidenciando que a maioria das partículas está na faixa de 1 a 100 μm , uma característica descrita por Mehta e Monteiro (2008) para cinzas volantes.

Observa-se que na mesma análise é possível perceber a distribuição granulométrica do RPP, destacando a maioria das partículas na faixa de 1 a 20 μm .

Registrar-se que essa característica sugere adequação para preencher os vazios deixados pelos grãos de cimento, como menciona Silva (2005), que especifica um intervalo característico de 10 a 50 μm em cimento Portland.

Figura 6 - Curva Granulométrica do CCA e do CP V-ARI RS



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

A análise da distribuição granulométrica da CCA está demonstrada na figura acima, indicando que todas as suas partículas têm tamanho inferior a 40 μm . Essa observação ressalta as características mencionadas por Mehta e Monteiro (2008), que afirmam que as partículas de cinza de casca de arroz, geralmente têm dimensões inferiores a 45 μm . O diâmetro médio dos materiais cimentícios está apresentado na tabela 5.

Tabela 5 - Diâmetro Médio dos Materiais

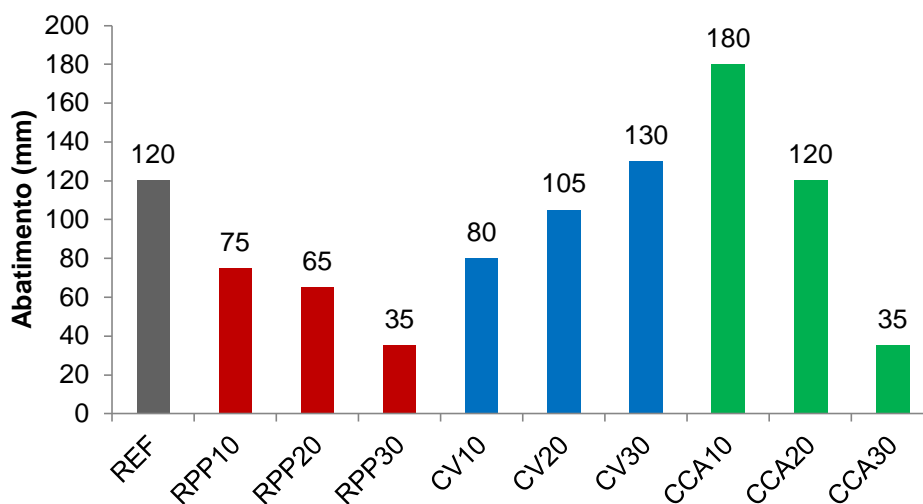
Material	Diâmetro Médio
RPP	5,38 μm
CV	14,42 μm
CCA	12,03 μm
CP V-ARI RS	13,04 μm

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Acrescenta-se que o embora, o diâmetro médio do CV e do CCA sejam próximos do CP V-ARI RS, como se observa na tabela acima, os dois resíduos se comportam de forma diferente, por conta do seu formato, enquanto o CV possui formato esférico, a CCA possui formato lamelar, além de a distribuição granulométrica ser diferente (CORDEIRO, 2009).

3.2 Propriedades no Estado Fresco

O ensaio de abatimento, realizado para todos os traços é apresentado na figura 7 que segue abaixo:

Figura 7 - Resultados do Ensaio de Abatimento

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Nesta perspectiva, Fernando Antonio Piazza Recena (2011) explica que a substituição de cinza volante em concretos, resulta em melhoria na trabalhabilidade, devido ao formato esférico de seus grãos. Essa observação é confirmada pelos dados apresentados na figura 7, onde é possível verificar que o aumento do teor de CV está associado ao aumento da trabalhabilidade.

Quanto a este aspecto técnico, Recena (2011) afirma que a forma esférica facilita a distribuição uniforme de água e cimento, conferindo ao concreto maior fluidez e tornando-o mais fácil de ser manuseado durante a construção.

No que se refere ao resíduo de polimento de porcelanato (RPP), observou-se o efeito oposto ao da cinza volante, ou seja, o aumento no teor de RPP resultou na diminuição da trabalhabilidade.

Destaca-se que esse mesmo fenômeno foi constatado no estudo de Grucheska Rayanne da Silva Almeida (2017), com a explicação que as partículas finas do RPP demandam mais água de amassamento durante a mistura, resultando em uma composição menos maleável e de manuseio mais desafiador.

Em relação ao teor de cinza de casca de arroz (CCA), à medida que o teor de substituição se eleva, há uma tendência de redução na trabalhabilidade do concreto.

Segundo as observações de F. S. Basquiroto *et al* (2014), esse fenômeno é atribuído ao formato lamelar da CCA, o qual pode comprometer a fluidez do concreto fresco, além da demanda excessiva de água devido à elevada superfície dos mesmos.

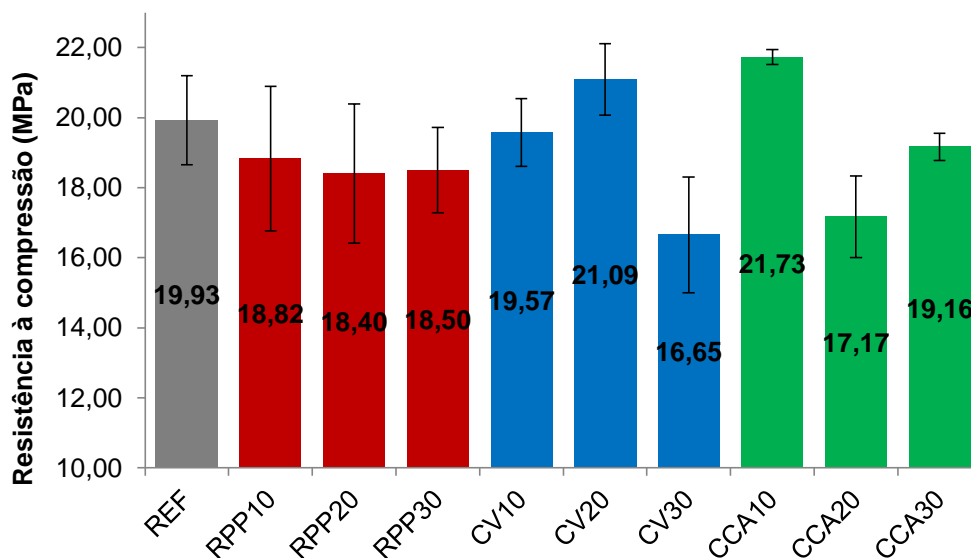
3.3 Propriedades no Estado Endurecido

Os resultados dos ensaios realizados no estado endurecido (resistência à compressão, densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta) seguem descritos em detalhes.

3.3.1 Resistência à compressão

Os resultados das resistências à compressão, obtidos após 28 dias de cura, considerando todos os traços de concreto, seguem apresentados na figura 8 abaixo:

Figura 8 - Ensaio de Resistência à Compressão



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Notou-se que ao incorporar resíduos de polimento de porcelanato (RPP), como substitutos, há uma leve variação na resistência mecânica, com diminuição de cerca de 5,5% no RPP10, 7,6% no RPP20 e 7,2% no RPP30, em comparação com a referência, porém esta alteração não é significativa. Neste contexto o RPP demonstrou não interferir na RC até o teor de substituição de 30%.

Estes resultados divergem dos estudos de Almeida (2017), que constatou aumentos significativos na resistência aos 28 dias.

No caso da cinza volante (CV), os resultados foram contra os estudos de Daiana de Souza (2014), que apresentava aumento significativo na resistência à

compressão aos 28 dias.

A figura 8 demonstra que o CV10 apresentou diminuição de 1,8%, o CV20 foi o oposto, houve aumento notável de aproximadamente 5,8% e o CV30 mostrou redução substancial de cerca de 16,4%, em relação ao concreto de referência. Por outro lado, Mehta e Monteiro (2008) afirmam que cimentos que incorporam cinza volante, em percentuais de substituição de 10, 20 e 30%, apresentam desenvolvimento de resistência um pouco mais lento em comparação com cimentos de referência, mas ao longo de períodos mais extensos há propensão a atingir resistência final superior quando comparados aos cimentos sem adições.

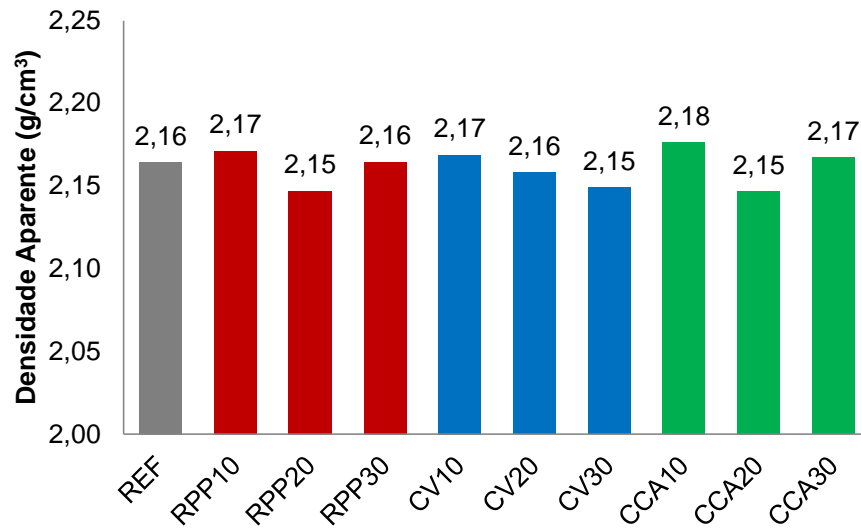
A cinza de casca de arroz (CCA) também teve impactos na resistência mecânica, sendo que o CCA10 demonstrou aumento de aproximadamente 9%, o CCA20 registrou redução de cerca de 13,8%, e o CCA30 apresentou diminuição de aproximadamente 3,8%. Esses resultados são consistentes com as conclusões de Sílvia Santos (1997), que indicavam desempenho inferior aos 28 dias, mas melhoria em períodos mais prolongados.

3.3.2 Densidade Aparente, porosidade aberta e absorção de água

A densidade aparente das amostras seguem representados e expostos na figura 9.

Observa-se que houve pouca variação na densidade aparente. No entanto, destaca-se que o traço CCA10 obteve maior resultado, assim como foi o superior na resistência à compressão, evidenciando que o material ficou mais densificado e por essa razão, apresentou maior resistência mecânica. Da mesma forma, nota-se que o traço com o menor resultado, CV30, também apresentou menor resistência mecânica.

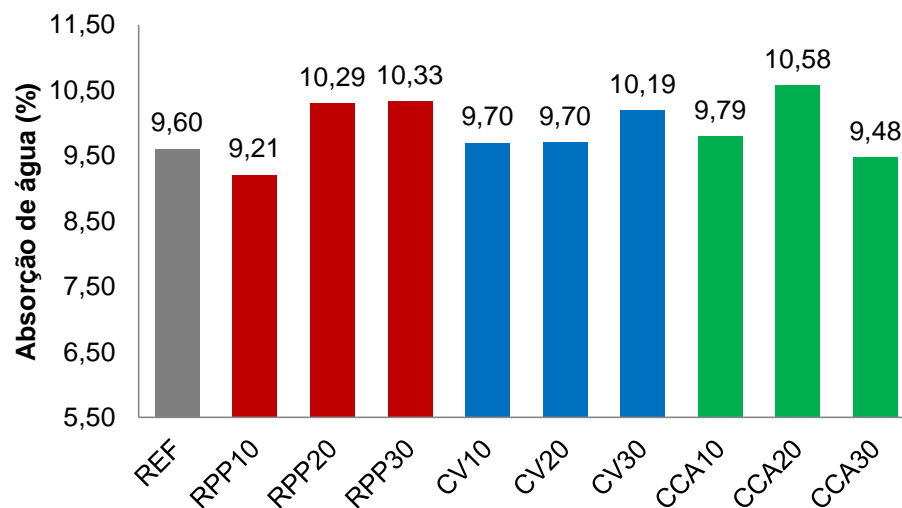
Figura 9 - Resultados de Densidade Aparente para Diferentes Traços



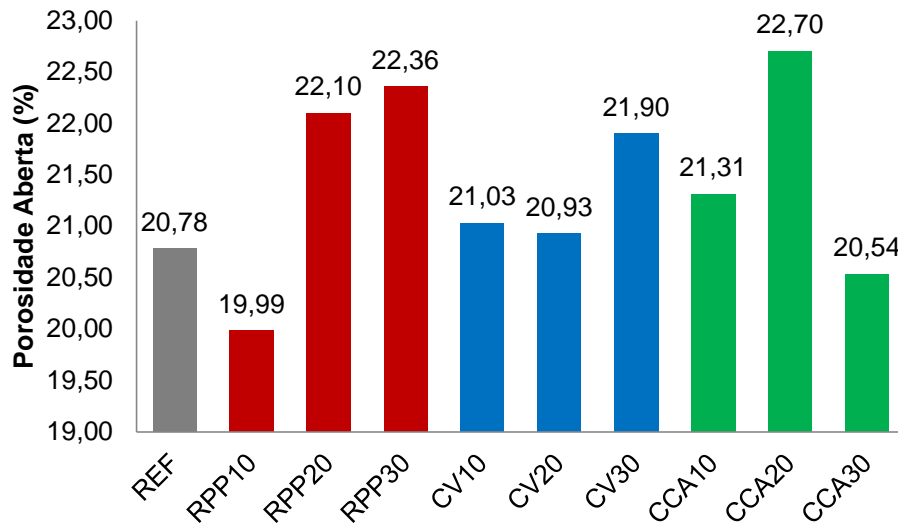
Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Além da densidade, foram registrados os dados relativos à absorção de água e à porosidade aberta, que serão apresentados nas figuras 10 e 11, respectivamente.

Figura 10 - Resultados de Absorção de Água para Diferentes Traços



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Figura 11 - Resultados de Porosidade Aberta para Diferentes Traços

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Percebe-se que nos traços em que a absorção de água foi superior ao concreto de referência, houve consequentemente, uma maior porosidade aberta, e o oposto também ocorreu.

A tabela a seguir exibe as variações percentuais de cada traço em relação à referência, indicando aumento ou diminuição.

Tabela 5 - Variação Percentual da Absorção de Água e da Porosidade Aberta em Relação à Referência

Traço	Variação da Absorção	Variação da Porosidade
RPP10	-4,15%	-3,83%
RPP20	7,19%	6,35%
RPP30	7,57%	7,59%
CV10	0,96%	1,18%
CV20	0,98%	0,70%
CV30	6,11%	5,37%
CCA10	1,96%	2,54%
CCA20	10,12%	9,24%
CCA30	-1,32%	-1,18%

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Os resultados de absorção de água e porosidade estão associados aos resultados de resistência, uma vez que as formulações com maior absorção de água

e porosidade apresentaram desempenho inferior ao concreto de referência, enquanto aquelas com menor absorção de água e porosidade mostraram resultados superiores.

4. CONCLUSÃO

Este estudo realizou a análise da substituição parcial do cimento Portland por três tipos de resíduos industriais: resíduo de polimento de porcelanato (RPP), cinza de casca de arroz (CCA) e cinza volante (CV).

Os resultados revelaram comportamentos distintos para cada tipo de substituição. No caso da cinza volante, identificou-se um teor ótimo de substituição de 20%, resultando em melhorias significativas na resistência à compressão, consistência, densidade e porosidade aberta do concreto.

Por outro lado, no resíduo de polimento de porcelanato, apesar de não demonstrar alterações significativas quanto a resistência mecânica, sua incorporação demonstrou resultados indesejados quanto a consistência, que pode ter afetado a densidade e porosidade do concreto, o que sugere uma adequação no teor de argamassa.

No que diz respeito à cinza de casca de arroz, verificou-se um teor ótimo de substituição de 10%, apresentando aumento na resistência à compressão, densidade e porosidade. No entanto, em relação à trabalhabilidade, também apresentou consistência não desejada, necessitando de ajuste composicional.

Conclui-se, portanto, que para cada tipo de resíduo é necessário desenvolver dosagem específica, não havendo receita única aplicável para todos, constatação que não descarta a viabilidade da substituição desses resíduos no concreto, desde que seja observada uma abordagem personalizada para cada material.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Grucheska Rayanne da Silva. **Reuso do pó de polimento de porcelanato em concreto**. 2017. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.

ANDREOLA, F. *et al.* *New Blended Cement from Polishing and Glazing Ceramic Sludge*. ***International Journal of Applied Ceramic Technology***, v. 7, n. 4, p. 546–555, 1 jul. 2010.

ANDREW, R. M. ***Global CO₂ emissions from cement production, 1928-2018***. *Earth System Science Data*, v. 11, n. 4, p. 1675–1710, 20 nov. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 17054**: Agregados - determinação da composição granulométrica - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 5738**: Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 16889**: Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 5739**: Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

BASQUIROTO, F. S. *et al.* Análise comparativa das propriedades de concretos convencionais com substituição parcial do cimento Portland por cinza da casca de arroz. ***Revista de Iniciação Científica*** (Criciúma), v. 12, p. 5-18, 2014.

CHALEE, W. *et al.* ***Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment***. *Cement and Concrete Composites*, v. 37, n. 1, p. 47–53, 1 mar. 2013.

CORDEIRO, LN.P. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 2009.

DAMINELI, B. L. *et al.* **Measuring the eco-efficiency of cement use.** *Cement and Concrete Composites*, v. 32, n. 8, p. 555–562, 1 set. 2010.

FADINI NATALLI, J. *et al.* *A review on the evolution of Portland cement and chemical admixtures in Brazil.* **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, n. 6, p. e14603, 28 jul. 2021.

HOPPE FILHO, J. **Sistema cimento, cinza volante e cal hidratada. Mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto.** Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

GIERGICZNY, Z. **Fly ash and slag.** *Cement and Concrete Research*, v. 124, p. 105826, 1 out. 2019.

HABERT, G. *et al.* *Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries.* **Nature Reviews Earth & Environment**, 2020 1:11, v. 1, n. 11, p. 559–573, 22 set. 2020.

JACOBY, P. C.; PELISSER, F. *Pozzolanic effect of porcelain polishing residue in Portland cement.* **Journal of Cleaner Production**, v. 100, p. 84–88, 1 ago. 2015.

JUNCKES, Ricardo. **Influência da adição de cinza volante na elevação de temperatura de concretos aplicados em blocos de fundação.** Dissertação (Pós-Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

MADDALENA, R.; ROBERTS, J. J.; HAMILTON, A. *Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements.* **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 933–942, 10 jun. 2018.

MARSH, B. K.; DAY, R. L.; BONNER, D. G. **Pore structure characteristics affecting the permeability of cement paste containing fly ash.** *Cement and Concrete Research*, v. 15, n. 6, p. 1027–1038, 1 nov. 1985.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON 2008.

PEDROZO, Éder Claro. **Estudo da utilização de cinza de casca do arroz residual em concretos estruturais: uma análise da durabilidade aos cloretos.** 2008. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

PELISSER, F.; STEINER, L. R.; BERNARDIN, A. M. *Recycling of porcelain tile polishing residue in portland cement: Hydration efficiency.* **Environmental Science and Technology**, v. 46, n. 4, p. 2368–2374, 21 fev. 2012.

RECENA, Fernando Antonio Piazza. **Método de dosagem de concreto pelo volume de pasta com emprego de cinza volante.** 2011. 263 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto

Alegre, 2011.

SANTOS, Sílvia. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos**. 1997. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SIDDIKA, A. *et al.* *State-of-the-art-review on rice husk ash: A supplementary cementitious material in concrete*. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, v. 33, n. 5, p. 294–307, 1 jul. 2021.

SIDERIS, K. *et al.* **Fly ash**. *RILEM State-of-the-Art Reports*, v. 25, p. 55–98, 2018.

SILVA, Guilherme Jorge Brigolini. **Estudo do comportamento do concreto de cimento portland produzido com a adição do resíduo de polimento do porcelanato**. 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

SOUZA, Daiana de. **Características de durabilidade de concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento**. 2011. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

WORRELL, E. *et al.* *Carbon dioxide emissions from the global cement industry*. **Annual Review of Energy and the Environment**, v. 26, p. 303–329, 2001.