

Utilização de cinzas de caldeiras industriais como substituição parcial do cimento Portland em argamassas

Fernanda L. S. Brandão^a, Vinícius A. Coelho^b, Cleidson C. Guimarães^{*b}

^aCentro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal da Bahia (UFRB), Cruz das Almas, Bahia, Brasil

^bPrograma de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, Bahia, Brasil

*cleidsonguimaraes@ufrb.edu.br

RESUMO: A construção civil tem buscado alternativas para redução de custos com a inserção de novos produtos e técnicas que garantam melhor desempenho das edificações. Nesse contexto, o presente trabalho baseia-se na análise do comportamento de argamassas, produzidas com substituição parcial do Cimento Portland (CP) por cinzas provenientes da queima de lenha de eucalipto e grevilea nas caldeiras de uma indústria calçadista. Para realização dessa pesquisa, foram produzidas argamassas com traço 1:3 e 1:6, com substituições parciais do CP pelas cinzas residuais de caldeiras (CRC) nas proporções de 0, 5, 10 e 15%. Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água por imersão e por capilaridade. Observou-se que o uso das CRC resultou em melhorias nas propriedades analisadas nas argamassas com o aumento do teor de cinzas, levando a significativos incrementos na resistência à compressão e redução da absorção de água.

PALAVRAS-CHAVE: Cinzas Industriais. Cimento Portland. Argamassa.

ABSTRACT: Civil construction has sought alternatives for cost reduction with the insertion of new products and techniques that guarantee better performance of buildings. In this context, the present work is based on the analysis of properties of mortars, produced with partial replacement of the Portland cement (CP) by ash from the burning of eucalyptus wood and grevilea in the boilers of a footwear industry. To perform this research, mortars with mix of 1:3 and 1:6 were produced, with partial substitutions of CP by the residual boiler ash (CRC) in the proportions of 0, 5, 10 and 15%. Tests of axial compressive strength, tensile strength by diametrical compression, absorption of water by immersion and by capillarity were performed. It was observed that the use of CRC resulted in improvements in the properties analyzed in mortars with increasing ash content, leading to significant increases in compressive strength and reduction of water absorption.

KEYWORDS: Industrial Ash. Portland Cement. Mortar.

1. Introdução

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) [1] o cimento Portland é uma comódite pouco substituível. Dados da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) [2] indicam que, em 2020, foram vendidas 60,8 milhões de toneladas de cimento Portland no Brasil. Já a produção mundial, no mesmo ano, foi estimada em 4,1 bilhões de toneladas [3]. Estando presente em todo tipo de construção, da mais simples moradia até a mais complexa obra de infraestrutura, é o principal ligante utilizado na produção do concreto. A indústria do cimento vem sendo considerada uma das maiores poluidoras do meio ambiente, tanto devido ao grande consumo das jazidas de calcário quanto às suas elevadas taxas de emissão de CO₂ [4, 5, 6 e 27].

Segundo o SNIC e a ABCP, citados pela CETESB [7], em escala mundial, aproximadamente 90% das

emissões de CO₂ oriundas da fabricação do cimento ocorrem durante a produção do clínquer, seja na calcinação ou descarbonatação da matéria-prima, seja na queima de combustíveis no interior dos fornos. Decorre disso que, para cada tonelada de clínquer produzido, estima-se que a mesma quantidade de CO₂ seja liberada no ambiente [8].

Nesse cenário, uma alternativa buscada por muitos pesquisadores do ramo da construção civil é promover a utilização de diversos resíduos em substituição parcial ao cimento Portland, entre eles resíduos de biomassa, à exemplo das cinzas de algaroba [9]; bagaço de cana de açúcar [10, 11], cinzas da biomassa da agroindústria do cacau [12], cinza de casca de coco verde [13], subprodutos industriais [14, 15], e até resíduo da produção do silício metálico [16].

A viabilidade de utilização de resíduos industriais, principalmente os inorgânicos oriundos da combustão, é favorecida pela similaridade entre esses resíduos e as adições minerais já comumente empregadas. Segundo Mehta e Monteiro [17], as adições minerais são materiais silicosos finamente divididos, sendo materiais que apresentam atividade pozolânica ou propriedades cimentantes, que podem ser adicionados às argamassas ou aos concretos visando melhorar suas propriedades. Para a NBR 11172:1990 [18], as adições minerais podem ser classificadas quanto à sua ação físico-química em três tipos: inertes, cimentantes e pozolânicas.

O cimento Portland é um ligante hidráulico cujos compostos a base de silicatos (C2S e C3S) reagem com a água (H) produzindo silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH), ou seja, $CxS + H \rightarrow C-S-H + CH$. Dentre os compostos produzidos na hidratação do cimento Portland, apenas o C-S-H contribui expressivamente para a resistência mecânica das matrizes cimentícias, refina os poros reduzindo a permeabilidade e é insolúvel em água com pH acima de 7. O CH contribui com a alcalinidade da matriz, estabilizando a camada passivadora da armadura que dificulta o processo de corrosão. Nesse contexto, desde que o teor de CH não fique inferior a 9,0, o hidróxido de cálcio pode ser convertido em novas moléculas de C-S-H para melhorar as propriedades mecânicas e durabilidade das matrizes. Os materiais pozolânicos cumprem esse papel, ou seja, reagem com o CH, em meio aquoso, formando C-S-H secundário (Pozolana + CH + H \rightarrow C-S-H) [19].

As adições minerais do tipo inertes/fíler são materiais essencialmente finos e uniformes, cuja ação é puramente física, e não possuem nenhuma atividade química, no sentido da produção de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H). Essas adições promovem o efeito do empacotamento granulométrico e funcionam como ponto de nucleação para hidratação dos grãos de cimento. Quando presentes em pequena quantidade (normalmente menos que 15% da massa do cimento) proporcionam melhorias sobre as propriedades da argamassa como: trabalhabilidade, massa específica, porosidade, redução da exsudação e a tendência à fissuração [20, 21, 22, 23].

De acordo com diversos autores [24, 25, 26], comumente, as adições minerais inertes promovem três efeitos físicos, essencialmente sobre a hidratação do cimento Portland, que são: a diluição do cimento; a redistribuição granulométrica; e a nucleação heterogênea.

O efeito de diluição está relacionado à substituição parcial do cimento pela adição mineral, diminuindo a quantidade de cimento e conseqüentemente provocando um aumento da relação água/aglomerante. Quanto maior o teor de substituição, menor será a quantidade de cimento Portland na matriz, acarretando assim menor teor de hidratos gerados ao longo do tempo, caso a adição não apresente atividade cimentante ou pozolânica [24, 25].

O efeito de distribuição granulométrica depende da finura da adição e da quantidade de inerte utilizado, e esta promove alteração na porosidade da mistura [25]. Este efeito ocorre devido ao preenchimento dos microporos pelas partículas inertes, promovendo uma elevação na área de contato entre o cimento e a água, colaborando, então, com a velocidade de hidratação do cimento e com a formação de C-S-H [26].

O empacotamento está relacionado com a correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente, o que influencia no consumo de pasta e em diversas propriedades da argamassa, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Sendo assim, os finos ocupam os vazios entre os grãos de areia, tendendo ao aumento da compactação do conjunto e, por conseqüência, podendo colaborar com o ganho de resistência e diminuição de porosidade da matriz [27].

A nucleação heterogênea ganha importância quanto maior for a finura do material inserido. Lawrence; Cyr e Ringot [25] definem a nucleação heterogênea como um processo físico que promove a ativação do cimento Portland. Trata-se, portanto, de um fenômeno catalítico no qual um material reduz a energia de ativação de uma reação química

sem que haja consumo da espécie química, funcionando apenas como uma superfície onde ocorre a hidratação.

Caso a adição auxilie na propriedade aglomerante que forma os materiais cimentícios, diz-se que este material tem atividade pozolânica. De acordo com a NBR 12653:2014 [28], materiais pozolânicos são definidos como materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. Para formar silicatos estáveis que têm propriedades cimentícias, é essencial que a pozolana esteja finamente subdividida, pois somente assim a sílica pode combinar com o hidróxido de cálcio na presença de água. Também é essencial que a sílica esteja em seu estado amorfo, isto é, vítreo, pois quando em estado cristalino sua reatividade é muito pequena [23].

Inúmeras são as vantagens da incorporação de adições minerais ao concreto, visto que podem melhorar a resistência à fissuração térmica devido à redução no calor de hidratação, sendo capaz de aumentar a estanqueidade da matriz por refinamento dos poros, e assim proporcionar uma maior durabilidade aos agentes químicos, como a expansão álcali-agregado e ataque por sulfato, como fruto da redução da alcalinidade (no caso de adições minerais pozolânicas), além de diminuir o custo e melhorar sua trabalhabilidade no estado fresco [17].

As cinzas são tipos de adições muito utilizadas para substituição parcial do clínquer. Sua composição é muito variada, pois depende desde as características genéticas do vegetal até as condições operacionais da caldeira na qual é realizada a queima. Entretanto, é possível verificar características pozolânicas, o que explica a utilização de resíduos sólidos minerais na construção civil [29].

O uso de cinzas como adição diminui o impacto ambiental e o custo da preparação de materiais cimentícios, pois substitui compostos de maior custo, evitando, ao mesmo tempo, a disposição das cinzas

no ambiente, e tornando o processo de fabricação de materiais cimentícios mais sustentável.

França, et al. [30] utilizaram cinza proveniente da queima de cavacos de eucalipto com teores de 10%, 20% e 30% de substituição ao cimento Portland para avaliar a viabilidade desse reaproveitamento por meio da análise das propriedades das argamassas no estado fresco. Os autores concluíram que a cinza de eucalipto possui características físicas adequadas para adição e contribuem para uma maior densidade de empacotamento do sistema que as contém devido às suas partículas serem menores que as do cimento. Além disso, observou-se também que devido ao fato de as cinzas apresentarem área superficial específica maior que o cimento e, conseqüentemente, demandar maior quantidade de água para o molhamento, argamassas que a contenham apresentam menor trabalhabilidade inicial, fato observado por meio de ensaios na mesa de consistência (*flow table*).

Gluitz e Marafão [31] desenvolveram uma pesquisa para avaliar a cinza da madeira de eucalipto na substituição parcial do cimento Portland em argamassa e foi avaliado o seu índice de pozolanicidade e características físicas e químicas. Para tal, moldaram-se corpos de prova de argamassa com adições de 0, 5, 10, 15 e 20% de cinza de madeira de eucalipto (CME), onde a partir de ensaios realizados concluiu-se que as cinzas promoveram uma queda de resistência das argamassas à medida que se aumentou o teor de substituição do CP pelas CME. Essa queda foi esperada devido ao resultado do ensaio de atividade pozolânica, no qual a cinza não apresentou potencial pozolânico.

No presente trabalho, foi utilizada como adição mineral a cinza proveniente da queima de lenha de eucalipto e grevília nas caldeiras da empresa Dass Calçados. Foram realizados ensaios de consistência, resistência mecânica e permeabilidade, a partir de amostras com diferentes percentuais das cinzas residuais de caldeiras (CRC) em substituição parcial do cimento Portland na produção das argamassas, que, além de reduzir o uso do cimento, dará uma nova destinação aos resíduos gerados por outro setor.

2. Metodologia

2.1 Materiais

Para realização dos ensaios, utilizou-se o CP V – ARI, com massa específica de 3,08 g/ml. Esse cimento foi escolhido por não possuir adições minerais pozolânicas, apresentando, ainda, máximo de 5% de materiais carbonáticos tal qual especifica a NBR 16697:2018 [32] – o menor teor dentre os demais cimentos disponíveis na região de Cruz das Almas. A água utilizada para produção e cura dos corpos de prova foi proveniente do sistema de abastecimento municipal.

Como agregado miúdo foi utilizado areia lavada média, módulo de finura de 2,92 e dimensão máxima característica de 2,4 mm, determinadas conforme procedimentos da NM 248:2003 [33]. A **Figura 1** apresenta o gráfico da distribuição granulométrica. Neste gráfico, é possível observar a curva de distribuição dos grãos do agregado miúdo e os limites das zonas utilizável e ótima, estabelecidos pela NBR 7211:2009 [34].

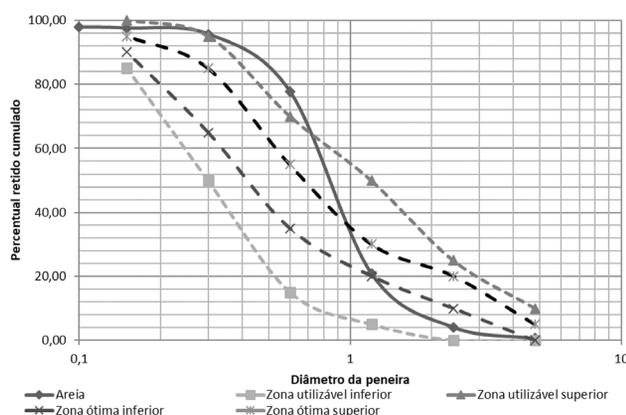


Fig. 1 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo e as zonas delimitadas pela NBR 7211:2009 [34]. Fonte: Os autores.

A cinza foi fornecida pela empresa Dass Calçados, localizada na cidade de Vitória da Conquista, no estado da Bahia. A cinza foi obtida através da queima da lenha de eucalipto e grevêlea nas caldeiras da indústria. Após obtenção, as cinzas foram resfriadas ao ar, armazenadas em recipiente vedado e impermeável e

levadas para o laboratório, onde foi seca em estufa a $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ por 24 horas e posteriormente peneirada, empregando peneira de abertura 0,075mm para a obtenção de uma granulometria próxima a do cimento.

O índice de desempenho pozolânico da CRC com cimento Portland aos 28 dias foi determinado em 77% com base nos procedimentos da NBR 5752:2014 [35]. Segundo a NBR 12653:14 [28], materiais com índice de atividade pozolânica (IAP) superior a 90% apresentam potencial pozolânico. Isso significa que o material não apresenta potencial de produzir C-S-H secundário por meio da interação entre os compostos da cinza e os hidróxidos da matriz cimentícia.

2.2 Métodos

Foram escolhidos dois traços para o estudo (relação aglomerante: agregado), observando o comportamento da cinza em mistura rica (traço 1:3) e pobre (traço 1:6) em cimento Portland com proporção água/aglomerante (a/agl) fixada em 0,54 e 1,05, respectivamente. A cinza foi utilizada como substituto parcial do cimento Portland nas porcentagens de 5%, 10% e 15%, sendo as formulações utilizadas apresentadas na **Tabela 1**. Geralmente, substituições de cimento Portland por teores maiores do que 15% tendem a reduzir as propriedades das matrizes cimentícias, em função do efeito de diluição do cimento. Quando se observa, em pesquisa prévia, que houve crescimento das propriedades avaliadas até 15%, então é justificável avançar a diluição para teores maiores [36]. Entretanto, essa foi a primeira pesquisa com o resíduo. Por isso, optou-se por avaliar a substituição com cimento Portland por teores de até 15% de CRC.

Tab. 1 – Proporção dos materiais nas argamassas.

Traço	a/agl	Teor de cinzas (%)	Cimento (g)	Cinza (g)	Areia (g)
1:3	0,54	0	624,0	0,0	1872,0
		5	592,8	31,2	1872,0
		10	561,6	62,4	1872,0
		15	530,4	93,6	1872,0
1:6	1,05	0	367,1	0,0	2202,4
		5	348,7	18,4	2202,4
		10	330,4	36,7	2202,4
		15	312,0	55,1	2202,4

Fonte: Os autores.

A moldagem dos corpos de prova seguiu os procedimentos da NBR 7215:2019 [37]. Eles foram mantidos nos moldes durante as primeiras 24 horas, sendo destinados à cura submersa em água saturada com cal por 28 dias. As argamassas produzidas foram analisadas no estado fresco através do ensaio de consistência, regido pela NBR 13276:2016 [38], e no estado endurecido, através dos ensaios de resistência à compressão axial, de acordo com a NBR 7215:2019 [37]; resistência à tração por compressão diametral, segundo a NBR 7222:2011 [39] e os ensaios referentes à durabilidade da matriz, que foram: o ensaio de absorção de água por imersão e por capilaridade, conforme NBR 9778:2005 [40] e NBR 9779:2012 [41], respectivamente.

Os resultados, com exceção do índice de consistência, seguiram os procedimentos de amostragem da NBR 7215:2019 [37] com posterior análise estatística de variância (ANOVA) com o teor de substituição de cinza como fator de variação. Os valores médios obtidos foram comparados entre si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

A interpretação estatística se deu através da comparação entre os valores de F e F-crítico fornecidos pela análise de variância, tendo como hipótese a influência significativa da substituição do cimento pela CRC em pelo menos um dos grupos na propriedade analisada. A confirmação da hipótese se dá para valores de F superiores ao F-crítico. O resultado do teste de Tukey é identificado através de letras ao lado dos valores médios nas tabelas de resultados, sendo que grupos com letras iguais não diferem significativamente entre si a 5% de probabilidade.

3. Resultados e discussões

3.1 Índice de Consistência

A consistência é uma das propriedades mais relevantes da argamassa no estado fresco. Essa propriedade está ligada à fluidez da mistura e representa a tendência de deformação da argamassa. Quanto maior for o espalhamento da argamassa sobre a mesa do ensaio, menor é a sua resistência

ao escoamento e, portanto, maior é a sua fluidez. Os resultados são apresentados na **Tabela 2**.

Pôde-se observar que, com o aumento no teor de substituição do cimento Portland pela CRC, houve um decréscimo progressivo no índice de consistência das argamassas, efeito diretamente ligado ao acréscimo na demanda por água devido à inserção de partículas mais finas que a do cimento com maior superfície específica, formando argamassas menos trabalháveis.

Tab. 2 – Índice de consistência das argamassas.

Traço	Teor de cinzas (%)	Índice de consistência (mm)
1:3	0	320
	5	318
	10	295
	15	282
1:6	0	268
	5	262
	10	258
	15	254

Fonte: Os autores.

Tab. 3 – Resistência à compressão axial.

Traço	Teor de cinzas (%)	Resistência à compressão (MPa)	Desv. pad. (MPa)	Coef. variação (%)
1:3	0	28,8 ^A	0,6	2,0
	5	28,0 ^A	0,4	1,3
	10	30,6 ^{AB}	1,4	4,5
	15	33,8 ^B	1,8	5,2
	F	11,836	F-crítico	4,346
1:6	0	8,7 ^A	0,2	2,0
	5	8,2 ^{AB}	0,5	6,2
	10	8,1 ^{AB}	0,2	2,9
	15	7,5 ^B	0,4	5,8
	F	5,555	F-crítico	4,066

Fonte: Os autores.

3.2 Resistência à compressão

A **Tabela 3** apresenta os resultados obtidos de resistência à compressão axial das argamassas aos 28 dias, juntamente com os valores de F e F-crítico provenientes da análise de variância. Para o traço 1:3, foi observado que a substituição do cimento Portland por CRC apresentou tendência ao acréscimo da resistência à compressão axial a partir do teor de 10%, sendo registrada uma resistência 17,3% superior que a referência quando empregado 15% de cinzas. Com base nos resultados do teste de Tukey, não houve variação na resistência para 5% de substituição. No traço 1:6, o uso da CRC apresentou tendência à redução da resistência, ainda que não afetasse

significativamente o parâmetro até o teor de 10% de substituição, sendo registrada média 13,8% menor que a referência no teor de 15%.

Observando o comportamento da resistência à compressão das argamassas em função do teor de cinzas, nota-se que, tanto maior o teor de substituição do cimento Portland por CRC em traços mais ricos (1:3), maior é a resistência à compressão. Pode-se explicar esse comportamento apropriando-se das ideias de Castro, Pandolfelli [24], Lawrence, Cyr e Ringot [25]. Segundo esses autores, o efeito de diluição do cimento Portland pode ser compensado no processo de refinamento de poros, que provoca maior densificação da matriz, reforçando o esqueleto granulométrico e aumentando a resistência à compressão. A absorção de água também colabora com essa interpretação. O efeito de diluição do cimento Portland tende a diminuir a quantidade de C-S-H produzido pela hidratação, conseqüentemente, maior a porosidade da matriz e maior a absorção de água. Todavia, os resultados indicaram que tanto maior o teor de substituição do cimento Portland, menor é o índice de absorção de água. Desta forma, pode-se inferir que o resíduo está colmatando os poros, ou seja, aumentando o preenchimento dos vazios aos quais foram preenchidos por água em matrizes com menores teores de CRC [42].

Gluitz e Marafão [31] observaram redução na resistência à compressão à medida que foi aumentado o teor de substituição do cimento Portland pelo resíduo. Já os resultados desta pesquisa apontaram para aumento da resistência à compressão com o aumento do teor de substituição. Apesar de os dois resíduos não apresentarem índice de atividade pozolânica, a diferença de comportamento provavelmente está associada as diferenças no formato, tamanho e distribuição das partículas entre a cinza da madeira e da CRC. Os efeitos do empacotamento de partículas resultando em aumento da resistência à compressão foram observados por Karadumpa e Pancharathi (2021) [42].

Para o traço 1:6, houve manutenção da resistência à compressão axial para teores de substituição de até 10%. Por ser uma argamassa com menor teor de cimento, a diluição do aglomerante pode não

estar sendo compensada quando ultrapassado este limite, visto que passam a existir mais vazios a serem preenchidos pelas partículas da cinza. Além disso, a menor quantidade de cimento resulta em uma menor produção de hidróxido de cálcio, fundamental para a ativação do potencial pozolânico da CRC.

Tab. 4 – Resistência à tração por compressão diametral.

Traço	Teor de cinzas (%)	Resistência à tração (MPa)	Desv. pad. (MPa)	Coef. variação (%)
1:3	0	2,7 ^A	0,1	2,2
	5	2,7 ^A	0,2	5,7
	10	3,0 ^B	0,04	1,3
	15	3,3 ^B	0,2	5,3
	F	17,682	F-crítico	3,862
1:6	0	0,9 ^A	0,0	0,0
	5	0,9 ^A	0,1	6,7
	10	1,0 ^B	0,1	5,6
	15	1,0 ^B	0,1	6,0
	F	7,615	F-crítico	3,862

Fonte: Os autores.

3.3 Resistência à tração na compressão diametral

Os resultados expostos na **Tabela 4** demonstram que, em ambos os traços, a substituição do cimento por CRC promoveu variações significativas na resistência à tração das argamassas, sendo que, em ambos os traços, o uso de CRC em até 5% não afetou o parâmetro, enquanto valores maiores levaram a acréscimos de resistência. A substituição do cimento Portland por 5% de CRC dilui o cimento reduzindo o teor de C-S-H produzido devido à hidratação do cimento Portland; entretanto, esse efeito de diluição está sendo compensado pela CRC por meio do aumento da densidade granular. Para o teor de 15% de substituição foi registrado acréscimo de 22,2% no traço 1:3 e 11,1% no traço 1:6. Vaske [43] concluiu que as cinzas de eucaliptos apresentaram elevada quantidade de picos no difratograma de raios-x, evidência típica de fases cristalinas, o que, segundo o autor, indicaria uma baixa reatividade do material. Deste modo, ressalta-se a provável influência pozolânica das cinzas da grevêlea. Na conclusão do estudo, Vaske [43] indicou a viabilidade das cinzas de Eucalipto como material fíler.

Tab. 5 – Coeficiente de absorção de água por imersão.

Traço	Teor de cinzas (%)	Coef. de absorção de água (%)	Desv. pad. (MPa)	Coef. variação (%)
1:3	0	9,12 ^A	0,22	2,38
	5	9,03 ^A	0,17	1,87
	10	8,18 ^B	0,12	1,47
	15	7,96 ^B	0,09	1,19
	F	70,367	F-crítico	3,238
1:6	0	11,18 ^A	2,1	1,44
	5	10,48 ^A	3,6	3,23
	10	9,64 ^B	2,2	1,62
	15	9,46 ^B	1,6	0,99
	F	72,727	F-crítico	3,238

Fonte: Os autores.

3.4 Absorção de água por imersão

A **Tabela 5** apresenta os coeficientes de absorção de água por imersão obtidos. No traço 1:3, as argamassas apresentaram redução significativa nos coeficientes de absorção a partir do teor de 10%, sendo registrados valores 10,3% e 12,7% menores para os teores de 10% e 15% de substituição, respectivamente. Comportamento análogo foi observado no traço 1:6 onde a redução foi de 13,8% e 15,4% nos teores de 10% e 15%, respectivamente.

Tais resultados apontam para uma redução da porosidade aberta da matriz, provavelmente em função do melhor empacotamento dos grãos e refinamento dos poros. Fenômenos similares foram observados por Lontero, Klein e Mazer [27, 42] ao estudar o efeito do empacotamento de partículas nas propriedades do concreto.

3.5 Absorção de água por capilaridade

Conforme exposto na **Tabela 6**, a substituição do cimento por CRC resultou em variações significativas do coeficiente de absorção por capilaridade em todos os níveis de substituição observados em ambos os traços. Para o traço 1:3, houve redução de 42,8%, 44,7% e 56,5% para os teores de 5%, 10% e 15% de substituição. Para o traço 1:6 a redução observada foi de 39,4%, 46,3% e 58,1% para os teores de 5%, 10% e 15% de CRC, respectivamente. Com base no teste de Tukey, observa-se que não há variação significativa entre os teores de 5% e 10% de substituição, ainda que ambos sejam significativamente diferentes

da referência com redução maior que 40% do coeficiente de absorção.

Desta forma, observa-se que, ao aumentar o teor de cinza na matriz cimentícia, ocorreu uma redução na absorção de água por capilaridade. Provavelmente a redução dos capilares se deu pelo tamponamento de poros por meio da produção de novas substâncias aglomerantes e devido à influência dos grãos da cinza na distribuição granulométrica, densificando a matriz e reduzindo sua porosidade aberta.

Tab. 6 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Traço	Teor de cinzas (%)	Coef. de absorção por capilaridade (g/cm ²)	Desv. pad. (MPa)	Coef. variação (%)
1:3	0	1,61 ^A	0,22	2,38
	5	0,92 ^B	0,17	1,87
	10	0,89 ^B	0,12	1,47
	15	0,70 ^C	0,09	1,19
	F	93,998	F-crítico	3,238
1:6	0	2,03 ^A	0,10	4,99
	5	1,23 ^B	0,09	7,63
	10	1,09 ^B	0,10	8,85
	15	0,85 ^C	0,02	2,86
	F	139,264	F-crítico	3,862

Fonte: Os autores.

4. Conclusões

Com base nos resultados observados, pode-se afirmar que a substituição de cimento Portland por CRC influenciou significativamente as propriedades analisadas e melhorou progressivamente as propriedades observadas das argamassas com o acréscimo dos teores de cinza empregados, sendo alguns comportamentos mais evidentes no traço 1:3, mais rico em aglomerante. Além disso, pode-se afirmar que:

- A CRC estudada não pode ser classificada como uma pozolana natural e, como tal, a influência nas propriedades resulta de sua influência física na densificação da matriz.
- A substituição do cimento Portland por até 15% de CRC aumentou a resistência à compressão axial em até 17,3% no traço 1:3.
- O emprego da CRC favoreceu a resistência à tração das argamassas, produzindo acréscimos de 22,2% no traço 1:3 e 11,1% no traço 1:6 quando empregado 15% de substituição.

- Em ambos os traços estudados, o uso da CRC tornou as argamassas progressivamente menos permeáveis, atingindo reduções de mais de 50% na absorção de água por capilaridade ao teor de 15% de substituição, o que sinaliza um potencial do seu uso para melhoria da durabilidade das matrizes cimentícias.

Referências

- [1] SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Características da Indústria Cimenteira**. Press Kit Agosto 2013.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Vendas de cimento**. 2021. Disponível em: <https://abcp.org.br/vendas-de-cimento-crescem-11-em-2020/>. Acesso em: 27 nov. 2021.
- [3] STATISTA. **Cement production worldwide from 1995 to 2020**. 2021. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>. Acesso em: 27 nov. 2021.
- [4] ABRÃO, P. C. R. A.; CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M. Efficiency of Portland-pozzolana cements: Water demand, chemical reactivity and environmental impact. **Construction and Building Materials**, v. 247, 2020.
- [5] CARVALHO, S. Z. et al. Reducing environmental impacts: The use of basic oxygen furnace slag in portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 385–390, 2018.
- [6] IGE, O. E. et al. A review of the effectiveness of Life Cycle Assessment for gauging environmental impacts from cement production. **Journal of Cleaner Production**, v. 324, n. September, p. 129213, 2021.
- [7] CETESB. Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa associadas aos Processos Industriais: Produtos Mineraiis, Produção de Cimento do Estado de São Paulo, 1990 a 2008. **1º Relatório de Referência**. São Paulo, out. 2010.
- [8] MELO, F. C. A. C. **Análise de argamassas com substituição parcial do Cimento Portland por cinza residual de lenha de Algaroba** Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.
- [9] PIRES, Dannúbia Ribeiro. **Desenvolvimento de Argamassas com Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinzas de Algaroba Geradas do APL (Arranjo Produtivo Local) de Confeções Pernambucano**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal e Pernambuco, Caruaru, 2016.
- [10] FORMAGINI, Sidiclei et al. Propriedades físicas de concretos com substituição do cimento. **Revista de Engenharia Civil**, [s.l.], v. 1, n. 46, p.31-37, maio 2013.
- [11] CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R., Cinza ultrafina do bagaço de cana-de-açúcar: material pozolânico de alto potencial para países tropicais. **RIEM-Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 3, n. 1, 2009.
- [12] SILVA, R. B., Cinzas de biomassa geradas na agroindústria do cacau: caracterização e uso em substituição ao cimento. **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 15, n. 4, p.321-334, dez. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212015000400053>.
- [13] GUIMARÃES, C. C.; MATOS, S. R. C., Utilização da cinza da casca do coco verde como substituição parcial do cimento Portland em argamassas. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 13, n. 1.
- [14] CHOWDHURY, S. et al. Comparison of Mechanical Properties of Mortar Containing Industrial Byproduct. **Apctee Procedia**, [s.l.], v. 9, p.317-322, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apctee.2014.01.056>.
- [15] NAYAKA, R. R. et al. Microstructural investigation and durability performance of high volume industrial by-products-based masonry mortars. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 189, p.906-923, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.020>.
- [16] SOUZA, G. T.; GOUVEIA, F. P.; CUNHA, R. Estudo da aplicação do resíduo da produção de silício metálico como adição mineral na produção do cimento AÇAÍ. **Revista de Engenharia Civil**, Braga, v. 1, n. 55, p.29-35, jul. 2018.
- [17] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (ABNT). NBR 11172: **Aglomerantes de Origem Mineral- Terminologia**. Rio de Janeiro, 1990.
- [19] CHU, D. C. et al. Determination of the degree of hydration of Portland cement using three different approaches: Scanning electron microscopy (SEM-BSE) and Thermogravimetric analysis (TGA). **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00754, 2021

- [20] FARINHA, C. B.; BRITO, J.; VEIGA, R. Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de resíduos de louça sanitária: efeito de filler e potencial efeito pozolânico. **Revista de Engenharia Civil**, [s. L.], v. 1, n. 53, p.57-69, dez. 2016.
- [21] DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais para Concreto Estrutural. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. v.1. São Paulo, SP: IBRACON, 2005. Cap. 12, p. 345 – 379.
- [22] NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**, 2 ed. São Paulo: Editora Pini, 1997.
- [23] OLIVEIRA, Ivone R. de et al. **Dispersão e Empacotamento de Partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000.
- [24] CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, São Carlos, n. 55, p.18-32, 2009.
- [25] LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars Effect of inert materials on short-term hydration. **Cement And Concrete Research**, France, n. 33, p.1939-1947, 2003.
- [26] BONAVETTI, V. L.; RAHHAL, V. F. Interacción de Adiciones Minerales en Pastas de Cemento. **Revista de La Construcción**, Olavarría, v. 5, n. 2, p.33-41, 2006.
- [27] LONDERO, C.; KLEIN, N. S.; MAZER, W. Study of low-cement concrete mix-design through particle packing techniques. **Journal of Building Engineering**, v. 42, n. April, p. 103071, 2021.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (ABNT). **NBR 12653: Materiais pozolânicos — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.
- [29] FOELKEL, Celso. **Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose Kraft de Eucalipto: Resíduos Minerais**. Eucalyptus Online Book. São Paulo, v. 25, n. 5, out. 2011.
- [30] FRANÇA, D. F. S. et al. Avaliação da reologia, da RAA e das propriedades de argamassas no estado fresco utilizando cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento Portland. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 3, p. 153-166.
- [31] GLUITZ, A. C.; MARAFÃO, D. **Utilização da cinza da madeira de eucalipto na substituição parcial do cimento Portland em argamassa**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (ABNT). **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.
- [33] _____. **NM 248: Agregados- Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- [34] _____. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.
- [35] _____. **NBR 5752: Materiais Pozolânicos- Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 2014.
- [36] COELHO, V. A. et al. Evaluation of mortar properties obtained through partial substitution of Portland cement by ashes of oil palm empty fruit bunch. **Cerâmica**. 2019, v. 65, n. 375, pp. 359-365. <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653752575>.
- [37] _____. **NBR 7215: Cimento Portland Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 2019.
- [38] _____. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2016.
- [39] _____. **NBR 7222: Concreto e argamassa- Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.
- [40] _____. **NBR 9778: Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de Água por Imersão – Índice de Vazios e Massa Específica**. Rio de Janeiro, 2005.
- [41] _____. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012.
- [42] KARADUMPA, C. S.; PANCHARATHI, R. K. Influence of gradation of aggregates using particle packing methods on strength and microstructure of blended cement mortars. **Materials Today: Proceedings**, 2021.
- [43] VASKE, N.R. **Estudo preliminar da viabilidade de aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiclone pela combustão de lenha de Eucalipto em Caldeira fumotubular como adição ao concreto**. 321 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.