ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Concretos Ecoeficientes – Uma oportunidade de valoração do pó de RCD

Eco-efficient concretes - An opportunity to value CDW powder

Melissa Pastorini Proença
Universidade Federal do Paraná e Instituto Federal do Paraná | Foz do Iguaçu | Brasil | melissa.proenca@ifpr.edu.br
Dayana Ruth Bola Oliveira
Universidade Federal da Integração Latino-Americana| Foz do Iguaçu | Brasil | dayruth@gmail.com
Mayara Pastorini Proença
Universidade Federal da Integração Latino-Americana| Foz do Iguaçu | Brasil | mayarapproenca@gmail.com
Kathleen Dall Bello de Souza Risson
Instituto Federal do Paraná | Foz do Iguaçu| Brasil | kathleen.souza@ifpr.edu.br
Miguel Batista de Oliveira
Instituto Federal do Paraná | Foz do Iguaçu| Brasil | miguel.oliveira@ifpr.edu.br
Edna Possan
Universidade Federal da Integração Latino-Americana| Foz do Iguaçu| Brasil | epossan@gmail.com
Nayara Soares Klein
Universidade Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | nayaraklein@gmail.com

Resumo

A utilização de materiais cimentícios suplementares (MCS) combinada a técnicas de dosagem otimizadas são indispensáveis para o cumprimento das premissas de descarbonizar e desmaterializar, essenciais para o desenvolvimento sustentável na construção civil. Diante disto este estudo objetiva analisar o potencial de incorporação ao concreto de pós (Φ< 0,15mm) de resíduos de construção e demolição (RCD), oriundos de resíduos de concreto (PC) e cerâmica vermelha (PV). Analisou-se as características físico-químicos e a reatividade dos pós, sendo empregados como MCS na dosagem de concretos pelo método de Alfred (CV - concreto com pó cerâmico vermelho) e (CC - concreto com pó de concreto), analisados quanto à resistência à compressão aos 28 e 180 dias, resistividade elétrica aos 28 dias, e seus indicadores ambientais. Verificou-se que o pó cerâmico atua como pozolana, e o pó de concreto tem efeito de fíler. O consumo de ligante foi reduzido em 43% e 33%, com índices de carbono de 5,85 e

Como citar:

PASTORINI PROENÇA, Melissa; OLIVEIRA PRUNER, Dayana Ruth; PASTORINI PROENÇA, Mayara; BATISTA DE OLIVEIRA, Miguel; DALL BELLO DE SOUZA RISSON, Kathleen; POSSAN, Edna; SOARES KLEIN, Nayara. Concretos Ecoeficientes – Uma oportunidade de valoração do pó de RCD. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

6,73 kg de $CO_2/m^3/MPa$ (para CV e CC), a e classe de resistência C50 aos 28 dias, com risco insignificante de corrosão, evidenciando o potencial de incorporação dos pós de RCD, somado a otimização da dosagem possibilitaram concretos de alto desempenho.

Palavras-chave: Cimento ecoeficiente. Empacotamento de partículas. Pozolana. Pó reciclado. Baixo carbono.

Abstract

The use of supplementary cementitious materials (SCM) combined with optimized dosing techniques are essential for fulfilling the premises of decarbonization and dematerialization, essential for sustainable development in civil construction. In view of this, this study aims to analyze the potential for incorporating powders (Φ< 0.15mm) of construction and demolition waste (CDW), originating from concrete and red ceramic waste, into concrete. The physicochemical characteristics and reactivity of the powders were analyzed, being used as SCM in dosing using the Alfred method of concretes (CV - concrete with red ceramic powder) and (CC - concrete with concrete powder), analyzed for resistance. Compression at 28 and 180 days, electrical resistivity at 28 days, and their environmental indicators. It was found that ceramic powder acts as pozzolan, and concrete powder has a filler effect. Binder consumption was reduced by 43% and 33%, with carbon indices of 5.85 and 6.73 kg of $CO_2/m^3/MPa$ (for CV and CC), and resistance class C50 at 28 days, with risk negligible corrosion, highlighting the potential for incorporation of CDW powders, combined with the optimization of dosage, made high-performance concrete possible.

Keywords: Eco-efficient cement. Particle packaging. Pozzolana. Recycled powder. Low carbon.

INTRODUÇÃO

A sustentabilidade na construção civil está pautada nos princípios de descarbonização e desmaterialização [1,2], sendo o primeiro conceito uma consequência do segundo, referindo-se à mitigação das emissões de carbono e a redução do consumo de materiais. Dentro do grande setor da construção civil, a indústria do concreto tem seu crescimento fortemente impulsionado pela urbanização [3,4], o que é positivo no desenvolvimento dos países, porém essa indústria está atrelada a ampla exploração de recursos naturais, emissões de carbono e geração de resíduos [5–7].

A problemática neste contexto envolve o desenvolvimento urbano, em 2020 foram produzidos no mundo 14 bilhões de metros cúbicos de concreto, sendo 40% desse volume aplicado no mercado residencial [8], para isto foram fabricadas 4,2 bilhões de toneladas de cimento Portland [9] e estima-se para 2050 que essa produção atinja 6 bilhões [10]. O roteiro GCCA (Global Cement and Concrete Association) indica um aumento de 40% das emissões de carbono associadas a essa produção em 2050 se não forem tomadas medidas de redução, no mesmo ano em que almeja-se obter o cenário de zero emissões (net zero) [8].

A composição do concreto utiliza de modo geral dois insumos principais os agregados e o cimento Portland [11,12], e os impactos da fabricação destes materiais são somados na produção da concreteira. Apesar da mineração de agregados estar associada a danos ambientais e ao esgotamento de recursos naturais [13], o material notoriamente conhecido pelo seu impacto ambiental é o cimento Portland [9,14,15], no ciclo do concreto esse insumo corresponde a aproximadamente 77% das emissões de CO_2 [16].

Na produção cimenteira são emitidos 7% do CO_2 global, devido principalmente a produção de clínquer [14,15], o principal componente do cimento Portland. No entanto a indústria vem adotando estratégias para reduzir o teor de clínquer na composição do cimento Portland, utilizando substituições denominadas materiais cimentícios suplementares (MCS) [17,18], que reagem através de atividade hidráulica, pozolânica ou efeito fíler [19]. Nesse âmbito são explorados resíduos de outras cadeias produtivas como escórias, cinzas volantes, resíduos industriais [20] podendo inclusive ser aproveitado o próprio resíduo de construção e demolição na fração de pó oriundo da obtenção de agregados reciclados [21–23].

Além do processamento na indústria cimenteira, as substituições podem ser utilizadas na própria produção do concreto, reduzindo-se o consumo de cimento Portland [2,24]. Essa incorporação pode ser alcançada através de técnicas de otimização da dosagem, como o empacotamento de partículas [12,25] combinado ao uso de aditivos dispersantes [10,26], um método voltado a reduzir o volume de vazios na matriz, tornando-a mais densa e consequentemente melhorando o desempenho [27].

Portanto utilizar matérias-primas residuais em substituição a um material de grande impacto ambiental é a chave no cenário da indústria concreteira, além de ser uma estratégia de circularidade e descarbonização, o empacotamento de partículas possibilita a utilização eficiente dos insumos, sem comprometer o desempenho final do concreto. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial da incorporação de pós (Φ < 0,15 mm) reciclados de concreto e de cerâmica vermelha, ambos resíduos de construção e demolição, como material cimentício suplementar na produção de concreto, utilizado o modelo de Alfred para proporcionamento das misturas.

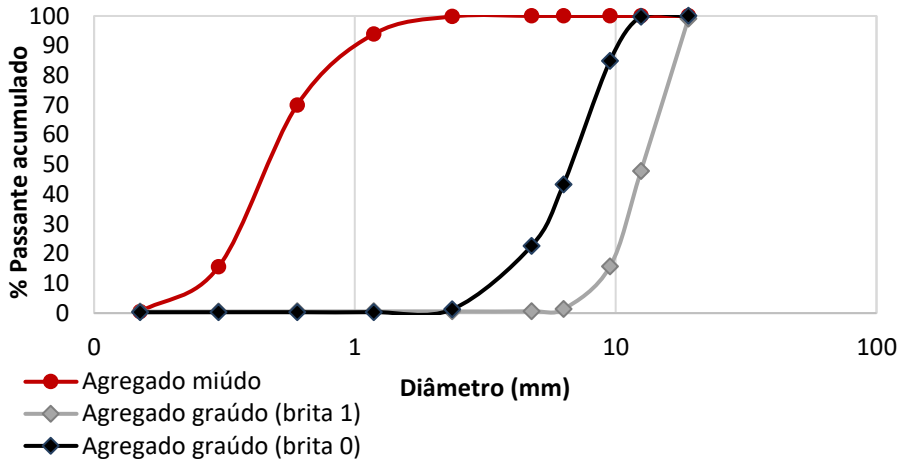
MATERIAIS

Para a composição dos concretos utilizou-se cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), com massa específica de 3,12 g/cm³, selecionado por ser o cimento de maior teor de clínquer dentre os comercializados no Brasil, e pós de resíduos de construção e demolição (RCD) como materiais cimentícios suplementares (MCS). Os agregados de origem natural foram agregados graúdo basáltico nas faixas 0 e 1 (com dimensão máxima característica de 12,5 e 19 mm respectivamente, e massa específica de 2,87 g/cm³) e agregado miúdo de quartzo (com dimensão máxima característica de 2,39 m, módulo de finura de 2,2, e massa específica de 2,66 g/cm³), sendo apresentadas na Figura 1 suas curvas granulométricas. Empregou-se também nas misturas um aditivo superplastificante a base de policarboxilato a fim de reduzir a relação a/f.

OBTENÇÃO DOS PÓS DE RCD

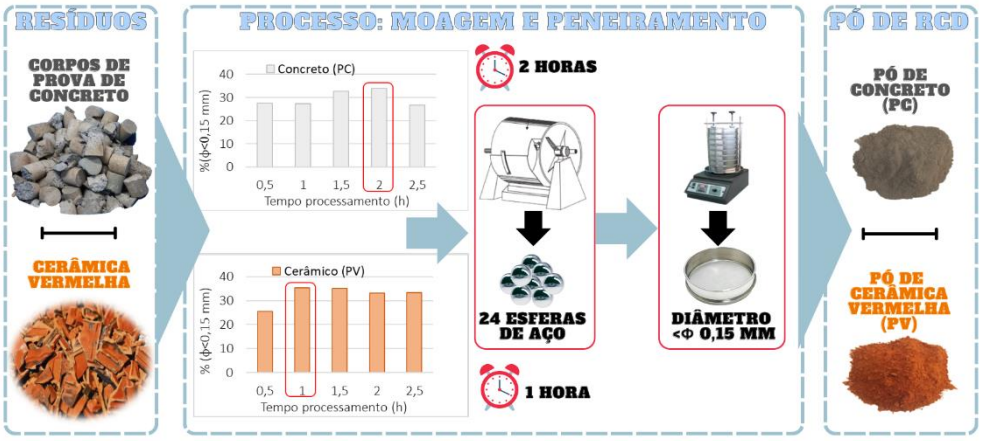
Os pós RCD utilizados neste estudo possuem duas origens, sendo o pó de concreto proveniente de resíduos de corpos de prova de laboratório de indústria concreteira e o pó cerâmico obtido a partir de resíduos da produção de tijolos em olaria.

Figura 1: Características dos materiais



O processamento dos resíduos (Figura 2) ocorreu em máquina de abrasão Los-Angeles, para adoção do período de moagem verificou-se a maior formação da fração passante na malha mesh #100 com diâmetro de partículas inferiores a 0,15 mm, sendo selecionados os períodos de 1 hora para o resíduo cerâmico, e 2 horas para o resíduo de concreto, ambos os materiais passaram por peneiramento para obtenção da fração de pó denominados PC (pó de concreto) e PV (pó cerâmico vermelho).

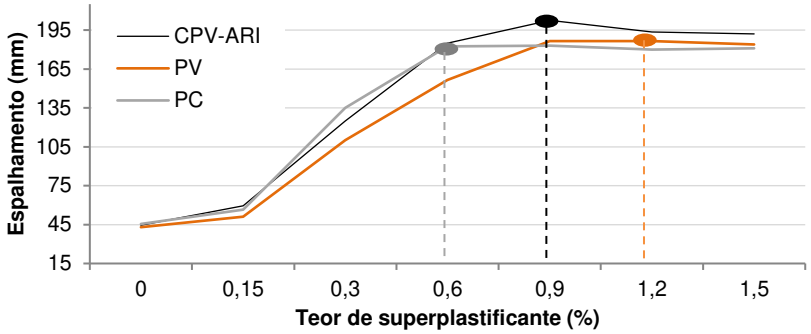
Figura 2: Obtenção dos pós de RCD



DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ADITIVO

O teor de aditivo superplastificante a ser utilizado nas misturas foi determinado para cada material, através da análise de saturação de aditivo em pastas de cimento Portland. Foram analisados os teores de 0, 0.15, 0.30, 0.60, 0.90, 1.20 e 1.50%, através do mini slump de Kantro (1980) [28], medindo o espalhamento para obtenção do teor ótimo. Foram definidos, portanto os teores de 0.90, 0.60 e 1.20% para CPV, PC e PV (Figura 3), a ser utilizados nos concretos conforme a quantidade desses materiais.

Figura 3: Teor de aditivo superplastificante



MÉTODOS

O projeto experimental (Figura 4) dividiu-se na caracterização dos pós de RCD obtidos e na dosagem e análise dos concretos com a incorporação do pó cerâmico (PV) e pó de concreto (PC) como materiais cimentícios suplementares (MCS).

Figura 4: Projeto experimental



CARACTERIZAÇÃO DOS PÓS

Os pós PC e PV foram caracterizados quanto a massa específica conforme NBR 16607 [29]. A análise granulométrica das partículas foi desenvolvida no granulômetro a laser modelo CILAS modelo 1190, em meio dispersante de isopropanol.

Para entender o comportamento das partículas de pó de RCD quanto a reatividade, foram desenvolvidos os ensaios de atividade com cal aos 7 dias de acordo com a NBR 5751 [30], índice de desempenho com cimento aos 28 conforme NBR 5752 [31], e análise do consumo de hidróxido de cálcio através do método Chapelle modificado proposto na NBR 15895 [32].

DOSAGEM, PRODUÇÃO E ANÁLISES DOS CONCRETOS

O proporcionamento dos concretos ocorreu utilizando o modelo de Andreasen e Andersen modificado, também conhecido como modelo de Alfred proposto por Funk e Dinger (1994)[33], que consiste na otimização da proporção de materiais afim de obter-se uma curva ideal, definido pela equação 1, sendo adotado o módulo de distribuição de 0,17.

$$CPFT = \frac{D^Q - D_{min}^Q}{D_{máx}^Q - D_{min}^Q} \text{ (equação 1)}$$

Onde:

CPFT = % cumulativa (volume) mais fina que o diâmetro da partícula;

D_{min} = diâmetro mínimo, menor partícula na mistura (mm);

$D_{máx}$ = diâmetro máximo, maior partícula na mistura (mm);

D = diâmetro das partículas (aberturas da peneira) (mm);

Q = módulo de distribuição.

Com a distribuição granulométrica dos materiais utilizados obtém-se uma curva real onde os percentuais de materiais: cimento Portland, MCS, agregado miúdo, agregado graúdo (brita 0 e brita 1), podem ser ajustados (analiticamente, em planilha eletrônica). Matematicamente quando o desvio entre a curva teórica de empacotamento (modelo de Alfred) e a curva da mistura (real) é mínimo, representado pela soma dos quadrados residuais, resulta em um empacotamento otimizado, calculado conforme equação 2 [34].

$$RSS = \sum_{i=1}^{n} (CPFT_{mix}(D_i^{i+1}) - CPFT_{alfred}(D_i^{i+1}))^2 \text{ (equação 2)}$$

Onde:

RSS = Resíduo da soma dos quadrados;

$CPFT_{mix}$= Porcentagem cumulativa (volume) mais fina que ‘‘D’’ mistura composta;

$CPFT_{alfred}$= Porcentagem cumulativa (volume) mais fina que ‘‘D’’, mistura curva ideal;

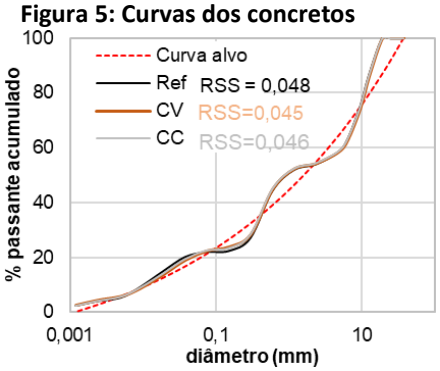
A composição dos concretos quanto ao consumo de materiais, denominados Ref (referência, sem utilização de MCS), CC (concreto com pó de concreto) e CV (concreto com pó cerâmico vermelho) é apresentada na Tabela 1 e Figura 5. O consumo de água foi definido para manter os abatimentos dos concretos na classe S160 (entre 160 a 220 mm, conforme NBR 8953 (ABNT, 2015), para concretos bombeáveis.

O procedimento de mistura do concreto seguiu o proposto por Damineli (2013)[35]. Os corpos de prova foram moldados e curados conforme preconiza a NBR 5738 [36], sendo analisadas na resistência à compressão axial aos 28 e 180 dias, conforme NBR 5739 [37]. A análise da resistividade elétrica superficial ocorreu aos 28 dias, foi utilizado método Wenner, dos quatro eletrodos, com o equipamento Resipod, Proceq de frequência de 40 Hz e corrente entre 10 µA e 200 µA, conforme a norma UNE 83988-2 [38].

Tabela 1: Consumos de materiais

Consumos (kg/m³)	Concretos		
	Ref	CC	CV
Cimento	526,33	353,32	300,01
Material cimentício suplementar	_	177,32	227,80
Agregado miúdo	664,37	660,05	644,65
Agregado graúdo (Brita 0)	457,20	450,30	436,56
Agregado graúdo (Brita 1)	591,56	617,49	616,23
Água	210,53	191,03	205,85
Aditivo superplastificante	4,74	4,78	4,75

Figura 5: Curvas dos concretos



O desempenho ambiental quanto as intensidades de carbono e ligante foram mensurados conforme estabelecido por Damineli et al. (2010), sendo o índice de ligante a razão entre o consumo de cimento e a resistência à compressão aos 28 e 180 dias, conforme equação 3.

$$IL = \frac{Ccim}{fck} \qquad \text{(equação 3)}$$

Onde:

IL = intensidade de ligantes (kg/m³/MPa);

$Ccim$ = consumo de cimento Portland (kg/m³);

fck = resistência à compressão aos 28 e 180 dias (MPa).

Para o índice de carbono foi necessário inventariar as emissões de carbono em kg de CO_2/m³ de concreto (equação 3), para então obter-se o índice em função das resistências à compressão, conforme (equação 4).

$$E = (E_{Cim} * C_{Cim}) + (E_{Agr.miúdo} * C_{Agr.miúdo}) + (E_{Agr.graúdo} * C_{Agr.graúdo}) + (E_{SP} * C_{SP})$$

(equação 3)

Onde:

E = Emissão total do concreto (kgCO_2/m³);

E_{Cim} = Emissão do cimento (kgCO_2/kg);

C_{Cim} = Consumo de cimento (kg/m³);

$E_{Agr.miúdo}$ = Emissão do agregado miúdo (kgCO_2/kg);

$C_{Agr.miúdo}$ = Consumo de agregado miúdo (kg/m³);

Como citar:

PASTORINI PROENÇA, Melissa; OLIVEIRA PRUNER, Dayana Ruth; PASTORINI PROENÇA, Mayara; BATISTA DE OLIVEIRA, Miguel; DALL BELLO DE SOUZA RISSON, Kathleen; POSSAN, Edna; SOARES KLEIN, Nayara. Concretos Ecoeficientes – Uma oportunidade de valoração do pó de RCD. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

$E_{\text{Agr.graúdo}}$ = Emissão de agregado graúdo (kgCO_2/kg);

$C_{\text{Agr.graúdo}}$ = Consumo de agregado graúdo (kg/m³).

E_{SP} = Emissão de aditivo superplastificante (kgCO_2/kg);

C_{SP} = Consumo de aditivo superplastificante (kg/m³).

$$IC = \frac{E}{fc} \quad \text{(equação 4)}$$

Onde:

IC = Intensidade de CO_2, em kg/m³/MPa;

E = Emissões totais de CO_2, gerado pela produção e transporte de todos os materiais constituintes do concreto, em kg/m³.

fc = Resistência à compressão do concreto em MPa.

As emissões (Quadro 1) do CPV-ARI, agregado graúdo e miúdo foram obtidas do Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC), já os dados de emissões do aditivo superplastificante foram adotados de uma Declaração Ambiental de Produto (similar). Para os pós de RCD, considerou-se o processamento por moagem dos resíduos de construção e demolição, sendo utilizado o indicador de emissões no processo de moagem do clínquer (considerando um processo industrial) multiplicado pelos períodos de moagem dos materiais conforme Oliveira (2022)[39].

Quadro 1: Dados de emissões de carbono utilizados

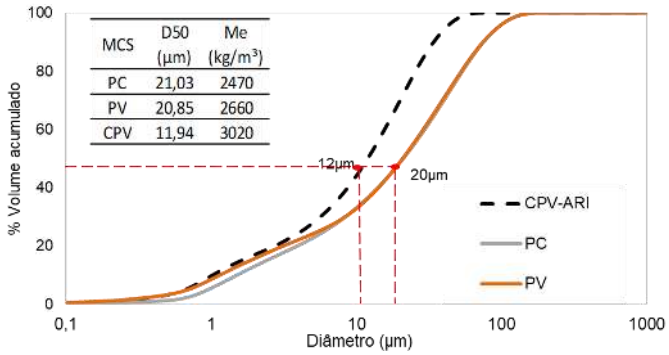
Emissões de CO_2		**Fonte**	**Kg de CO_2/Kg**
Pós de RCD	Cerâmico vermelho (PV)	OLIVEIRA. 2022	0,025
	Concreto (PC)		0,049
CPV-ARI		SIDAC. 2023	0,776
Aditivo superplastificante		EFCA - EPD. 2021	1,53
Agregado miúdo natural		SIDAC. 2023	0,013
Agregado graúdo natural		SIDAC. 2023	0,005

RESULTADOS

CARACTERISTICAS DOS PÓS

Na distribuição granulométrica após 1h de moagem do PV foi possível observar um tamanho médio (D_{50}) de partículas de 21,03 µm. Para o PC foi necessária moagem de 2h para atingir um D_{50} de 20,85µm, conforme Figura 6. Nota-se uma maior eficiência na moagem dos resíduos cerâmicos, constatação também realizada por Wu et al., (2022) [40], que associa à dureza e tipo de processamento do material. Os valores encontrados estão coerentes com a literatura [41,42]. O resíduo de cerâmica vermelha apresentou massa específica de 2660kg/m³ e o resíduo de concreto 2470kg/m³, similares a faixa encontrada nas cinzas volantes [43].

Figura 1: Distribuição de tamanho das partículas dos pós reciclados



Em relação à atividade pozolânica dos pós reciclados (Figura 7), o PV apresentou reatividade no ensaio com cal aos 7 dias e também no ensaio Chapelle modificado, com um consumo de 805 mgCa(OH_2)[11,44]. No entanto, o desempenho com cimento Portland aos 28 dias não atingiu a especificação de norma (87%, sendo o requisito mínimo de 90%, NBR 12653 [45], semelhante ao resultado encontrado por Brekailo et al., (2019) [46]).

O PC não apresentou reatividade significativa nas análises com consumo de cal e ensaio Chapelle, indicando que o pó de concreto não possui quantidade significativa de compostos silicosos ou aluminosos capazes de consumir hidróxido de cálcio. Quanto ao desempenho com cimento Portland aos 28 dias, resultou em 73%, não sendo considerado material pozolânico, mas atuando no efeito de preenchimento da microestrutura [21,22].

Figura 2: Atividade pozolânica dos pós reciclados



ANÁLISES DOS CONCRETOS

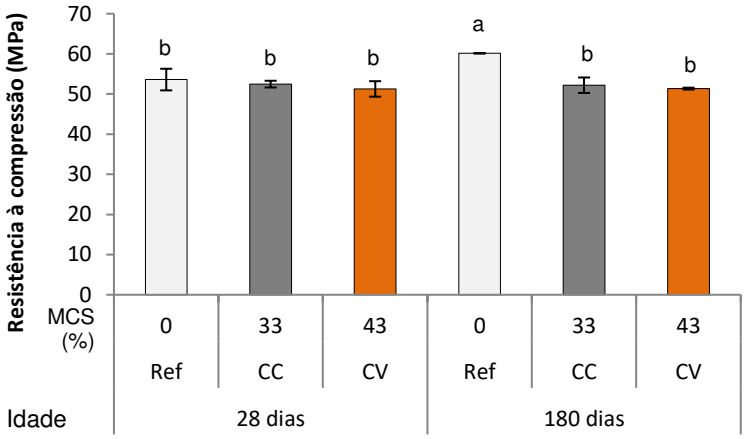
Quanto a resistência à compressão axial dos concretos com MCS (Figura 8), aos 28 dias atingiram aproximadamente 50 MPa, atendendo a NBR 8953 (ABNT 2015) para a classe de resistência C50 de concretos estruturais.

Os concretos CV e CC, com 43% e 33% de substituição ao cimento Portland, apresentaram resultados estatisticamente iguais à referência aos 28 dias, denotando a redução potencial de clínquer e a viabilidade do emprego dos pós de RCD em concretos para um mesmo desempenho mecânico.

Ge et al., (2012)[47] obtiveram redução de desempenho entre 1,8 e 4,2% com a incorporação de pó de resíduo cerâmico, em substituição ao cimento, chegando em um proporcionamento ideal de 25% de substituição. Estudos similares também relatam não ocorrer impacto significativo nas resistências a compressão em substituições de cimento por material cimentício suplementar em até 30% [48]. Ma et

al., (2020) [49] atribui os resultados ao melhor empilhamento e ao efeito de enchimento de microagregados, gerando um preenchimento dos poros.

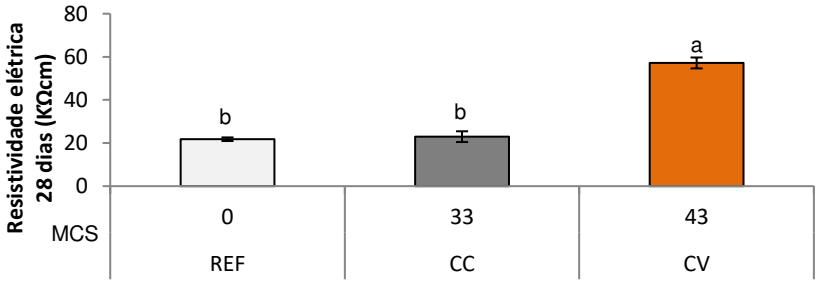
Figura 3: Resistência à compressão dos concretos



Aos 180 dias não houve ganho de resistência nos concretos com pó reciclado, entretanto o concreto referência produzido com cimento CPV-ARI apresentou um acréscimo de 12% no desempenho à compressão. À medida que se aumentam os teores de substituição existe uma tendência natural ao declínio da resistência, Kim (2017)[50] associa os decréscimos na resistência à compressão à uma menor reatividade das adições, possivelmente o pó de cerâmica vermelha e pó de concreto tem predominância de efeito fíler, especialmente o pó cerâmico que apresentou atividade pozolânica, o alto teor de substituição somado a uma reatividade baixa não ocasionou ganho de resistência em idade avançada.

Os resultados de resistividade elétrica (Figura 9), indicam que a adição de resíduos resultou em ganho de desempenho na resistividade dos corpos de prova cilíndricos. Todos os concretos analisados apresentaram risco insignificante de corrosão (resistividade>20 KΩcm) [51,52]. O CC comporta-se de modo semelhante a referência, e o CV apresenta um ganho expressivo de 172%. É esperado uma melhor performance para misturas empacotadas, pois o efeito de preenchimento densifica a matriz e acelera as reações de hidratação, corroborando no estreitamento dos poros e gerando uma rede de poros mais sinuosa, o que dificulta a passagem da corrente elétrica [53], visto que em misturas com maior porosidade a corrente elétrica flui mais facilmente, reduzindo assim os índices de resistividade [54].

Figura 4: Resistividade elétrica dos concretos



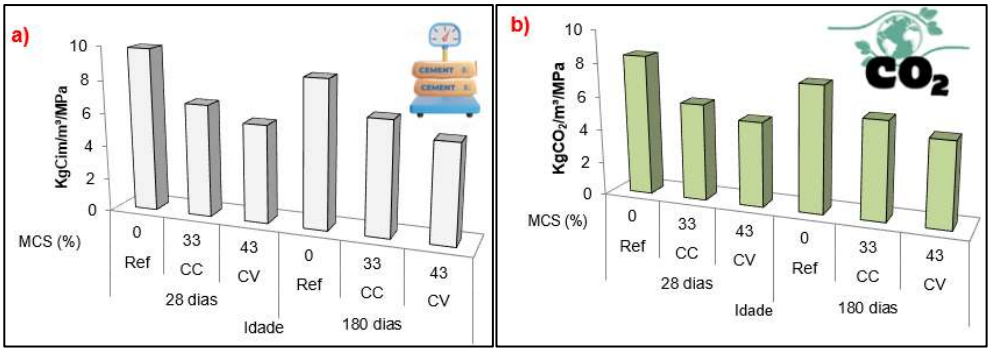
Likes *et al.,* (2022) [55] citam que materiais cimentícios suplementares com maior reatividade apresentem também maior resistividade elétrica, e sugerem que a

resistividade elétrica pode ser um indicador indireto de atividade pozolânica. Como a resistividade representa a resistência a passagem de corrente elétrica (iônica) do concreto, é uma propriedade que permite inferir conhecimentos quanto a durabilidade do material, quando submetido a carbonatação ou ataque de cloretos, que são mecanismos prejudiciais no caso de concreto. Portanto uma maior resistividade representa maior durabilidade do material.

DESEMPENHO AMBIENTAL DOS CONCRETOS

Os concretos com adição de pós reciclados obtiveram melhores índices ambientais aos 28 e aos 180 dias (Figura 10 a), dada a redução dos consumos de cimento o qual tem alto índice emissivo. O índice de ligantes dos concretos produzidos com material cimentício suplementar ficou entre 6,76 e 5,85 kg de cimento/m³/MPa para o CC e CV respectivamente, enquanto a referência chegou à 9,82 kg de cimento/m³/MPa.

Figura 5: a) Índice de ligante; b) Índice de carbono



Em relação a referência aos 28 dias, o concreto produzido com 33% de pó de concreto reduziu 31% as emissões de CO_2 (Figura 10 b) e o concreto produzido com 43% de pó de cerâmica vermelha reduziu em 40% as emissões, sendo possível observar uma correlação entre o teor de substituição e o potencial de redução das emissões. Estudos anteriores relatam índices mais moderados de redução de CO_2 chegando a 20% [41,54].

O índice de CO_2 está diretamente atrelado ao desempenho dos concretos, como aos 180 dias houve ganho de resistência à compressão apenas no concreto referência os percentuais de redução de CO_2 ficaram um pouco menores, variando entre 23% para o CC e 33% para o CV. Entretanto ainda são valores de potencial representativos considerando a escala de produção de concretos.

O concreto com resíduo cerâmico apresentou melhor desempenho ambiental, com IC de 5,06 Kg.CO_2/m³/MPa, e IL de 5,85 Kg.Cim/m³/MPa aos 28 dias, conforme Damineli et al., (2010) [26] índices de ligante abaixo de 5 Kg.Cim/m³/MPa representam maior ecoeficiência do material, portanto os resultados deste estudo mostram-se promissores. Hoppe Filho et al., (2021) [41] relatam que a substituição do cimento Portland em até 30% é ambientalmente eficiente, considerando desempenho e emissões de CO_2. Entende-se que os pós de RCD são materiais residuais com potencial de valorização através da reciclagem e seu uso acarreta benefícios ambientais e econômicos [49].

CONCLUSÕES

Retomando ao objetivo proposto de avaliar o potencial de incorporação como material cimentício suplementar na produção de concreto, dos pós (Φ < 0,15 mm) reciclados de concreto e de cerâmica vermelha, pode-se concluir:

- A otimização da dosagem através do modelo de Alfred, possibilitou a incorporação de significativa quantidade de pó de RCD (33% de pó de concreto e até 43% de pó de cerâmica vermelha), aos concretos, mantendo desempenho semelhante ao concreto de referência, reforçando a eficácia na aplicação do método de dosagem por empacotamento.
- O pó de cerâmica vermelha atua sob o efeito de atividade pozolânica, justificando a elevada resistência mecânica nos concretos (estatisticamente igual á referência) e elevada resistividade, ainda que com alto teor de material incorporado (43%), em substituição ao cimento Portland.
- O pó de concreto contribui na matriz cimentícia sob efeito fíler, também com desempenho semelhante ao concreto de referência e significativa redução no consumo de cimento Portland (33%).
- Os concretos com pó de RCD apresentaram desempenho ambiental satisfatório, com elevado potencial de mitigação das emissões de CO_2, com ~40% de redução em relação à referência e até 43% de redução do consumo de cimento.

Existe uma gama de estudos quanto a incorporação de RCD como agregado, entretanto ainda permanece a disposição em aterros da fração de pó, a qual este estudo mostrou viabilidade de aplicação em concretos de maior ecoeficiência e desempenho superior a concretos convencionais. Além de promover a descarbonização através da redução de consumo de cimento (desmaterialização), ainda ocorre a valoração do pó de RCD.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal do Paraná. Ao Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA / UNILA). A Mineromix Concretos. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

[1] S. Sbahieh, M. Zaher Serdar, S.G. Al-Ghamdi, Decarbonization strategies of building materials used in the construction industry, Mater. Today Proc. (2023). https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.346.

[2] S. Barbhuiya, F. Kanavaris, B.B. Das, M. Idrees, Decarbonising cement and concrete production: Strategies, challenges and pathways for sustainable development, J. Build. Eng. 86 (2024) 108861. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108861.

[3] A. Adesina, Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions, Environ. Challenges. 1 (2020) 100004. https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100004.

[4] B. Lu, C. Shi, J. Zhang, J. Wang, Effects of carbonated hardened cement paste powder on hydration and microstructure of Portland cement, Constr. Build. Mater. 186 (2018)

699–708. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.159.

[5] M.R. Munaro, S.F. Tavares, A review on barriers, drivers, and stakeholders towards the circular economy: The construction sector perspective, Clean. Responsible Consum. 8 (2023) 100107. https://doi.org/10.1016/J.CLRC.2023.100107.

[6] L. Lima, E. Trindade, L. Alencar, M. Alencar, L. Silva, Sustainability in the construction industry: A systematic review of the literature, J. Clean. Prod. 289 (2021) 125730. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125730.

[7] I. Lande, R.T. Terje, Comprehensive sustainability strategy for the emerging ultra-high-performance concrete (UHPC) industry, Clean. Mater. 8 (2023) 100183. https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100183.

[8] GCCA, Concrete Future - Roadmap to Net Zero, Glob. Cem. Concr. Assoc. (2021) 1–48.

[9] Cembureau, Activity Report-2020, Brussels, 2021. https://doi.org/10.1007/BF02634808.

[10] K.L. Scrivener, V.M. John, E.M. Gartner, Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry, Cem. Concr. Res. 114 (2018) 2–26. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015.

[11] P.J.M. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais, 2ª edição, 2014.

[12] G. Habert, S.A. Miller, V.M. John, J.L. Provis, A. Favier, A. Horvath, K.L. Scrivener, Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries, Nat. Rev. Earth Environ. 1 (2020) 559–573. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3.

[13] H.M. Hamada, B.A. Tayeh, A. Al-Attar, F.M. Yahaya, K. Muthusamy, A.M. Humada, The present state of the use of eggshell powder in concrete: A review, J. Build. Eng. 32 (2020) 101583. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101583.

[14] WBCSD, IEA, Low Carbon Technology Roadmap for the Indian Cement Sector: Status Review 2018, (2018) 52. https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Low-Carbon-Technology-Roadmap-for-the-Indian-Cement-Sector-Status-Review-2018.

[15] SNIC e ABCP, Roadmap Tecnológico do Cimento, (2019).

[16] Z. Cao, E. Masanet, A. Tiwari, S. Akolawala, Decarbonizing Concrete Deep decarbonization pathways for the cement and, Ind. Sustain. Anal. Lab. Northwest. Univ. (2021).

[17] J. Skibsted, R. Snellings, Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends, Cem. Concr. Res. 124 (2019) 105799. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105799.

[18] I.Y. Hakeem, F. Althoey, A. Hosen, Mechanical and durability performance of ultra-high-performance concrete incorporating SCMs, Constr. Build. Mater. 359 (2022) 129430. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129430.

[19] M. Schneider, V. Hoenig, J. Ruppert, J. Rickert, The cement plant of tomorrow, Cem. Concr. Res. 173 (2023) 107290. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107290.

[20] R. Snellings, P. Suraneni, J. Skibsted, Future and emerging supplementary cementitious materials, Cem. Concr. Res. 171 (2023) 107199. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107199.

[21] T.C.F. Oliveira, B.G.S. Dezen, E. Possan, Use of concrete fine fraction waste as a replacement of Portland cement, J. Clean. Prod. 273 (2020) 123126. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123126.

[22] D.R.B. Oliveira, M.P. Proença, J. Marques Filho, E. Possan, Mixed construction and

demolition powder as a filler to Portland cement: study on packaged pastes, Ambient. Construído. 24 (2024). https://doi.org/10.1590/s1678-86212024000100715.

[23] D. Ruth Bola Oliveira, G. Leite, E. Possan, J. Marques Filho, Concrete powder waste as a substitution for Portland cement for environment-friendly cement production, Constr. Build. Mater. 397 (2023) 132382. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132382.

[24] M.U. Hossain, Y. Dong, S.T. Ng, Influence of supplementary cementitious materials in sustainability performance of concrete industry: A case study in Hong Kong, Case Stud. Constr. Mater. 15 (2021) e00659. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00659.

[25] S. Yousuf, L.F.M. Sanchez, S.A. Shammeh, The use of particle packing models (PPMs) to design structural low cement concrete as an alternative for construction industry, J. Build. Eng. 25 (2019) 100815. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100815.

[26] B.L. Damineli, F.M. Kemeid, P.S. Aguiar, V.M. John, Cement & Concrete Composites Measuring the eco-efficiency of cement use, Cem. Concr. Compos. 32 (2010) 555–562. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009.

[27] N.S. Klein, L.A. Lenz, W. Mazer, Influence of the granular skeleton packing density on the static elastic modulus of conventional concretes, Constr. Build. Mater. 242 (2020) 118086. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118086.

[28] D. Kantro, Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste—A Miniature Slump Test, Cem. Concr. Aggregates. 2 (1980) 95–102. https://doi.org/10.1520/cca10190j.

[29] ABNT, NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

[30] ABNT, NBR 5751: Materiais pozolânicos — Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

[31] ABNT, NBR 5752: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

[32] ABNT, NBR 15895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fi xado – Método Chapelle modifi cado. Rio de Janeiro, 2010.

[33] J.E. Funk, D.R. Dinger, Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions, 1994. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3118-0.

[34] R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC), Cem. Concr. Res. 56 (2014) 29–39. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.002.

[35] B.L. Damineli, Conceitos para formulação de concreto com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas, Universidade de São Paulo, 2013.

[36] ABNT, NBR 5738: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

[37] ABNT, NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

[38] AENOR, UNE 83988-2: durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo: determinación de la resistividad eléctrica: parte 2: método de las cuatro puntas o de Wenner, (2014).

[39] D.R.B. OLIVEIRA, Aproveitamento Da Fração Fina De Resíduo De Concreto Como Substituto Ao Cimento Portland, Tese de Doutorado - Universidade Federal do Paraná, 2022.

[40] Y. Wu, C. Liu, H. Liu, H. Hu, C. He, L. Song, W. Huang, Pore structure and durability of green concrete containing recycled powder and recycled coarse aggregate, J. Build. Eng. 53 (2022) 1–6. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104584.

[41] J. Hoppe Filho, C.A.O. Pires, O.D. Leite, M.R. Garcez, M.H.F. Medeiros, Red ceramic waste as supplementary cementitious material: Microstructure and mechanical properties, Constr. Build. Mater. 296 (2021) 123653. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123653.

[42] E. Navrátilová, P. Rovnaníková, Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars, Constr. Build. Mater. 120 (2016) 530–539. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.062.

[43] S. Li, J. Gao, Q. Li, X. Zhao, Investigation of using recycled powder from the preparation of recycled aggregate as a supplementary cementitious material, Constr. Build. Mater. 267 (2021) 120976. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120976.

[44] F. Brekailo, E. Pereira, E. Pereira, M.M. Farias, R.A. Medeiros-Junior, Red ceramic and concrete waste as replacement of portland cement: Microstructure aspect of eco-mortar in external sulfate attack, Clean. Mater. 3 (2022) 100034. https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2021.100034.

[45] ABNT, NBR 12653: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

[46] F. Brekailo, E. Pereira, E. Pereira, J.H. Filho, M.H.F. De Medeiros, Evaluation of the reactive potential of additions of red ceramic waste and comminuted concrete of CDW in cement matrix, Ceramica. 65 (2019) 351–358. https://doi.org/10.1590/0366-69132019653752552.

[47] Z. Ge, Z. Gao, R. Sun, L. Zheng, Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method, Constr. Build. Mater. 31 (2012) 289–293. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.002.

[48] J. Xiao, Z. Ma, T. Sui, A. Akbarnezhad, Z. Duan, Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste, J. Clean. Prod. 188 (2018) 720–731. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.277.

[49] Z. Ma, M. Liu, Z. Duan, C. Liang, H. Wu, Effects of active waste powder obtained from C&D waste on the microproperties and water permeability of concrete, J. Clean. Prod. 257 (2020) 120518. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120518.

[50] Y. Kim, Quality properties of self-consolidating concrete mixed with waste concrete powder, Constr. Build. Mater. 135 (2017) 177–185. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.174.

[51] H.W. Song, V. Saraswathy, Corrosion monitoring of reinforced concrete structures - A review, Int. J. Electrochem. Sci. 2 (2007) 1–28. https://doi.org/10.1016/s1452-3981(23)17049-0.

[52] P. Azarsa, R. Gupta, Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review, Adv. Mater. Sci. Eng. 2017 (2017). https://doi.org/10.1155/2017/8453095.

[53] R.T. Rios, F. Lolli, L. Xie, Y. Xie, K.E. Kurtis, Screening candidate supplementary cementitious materials under standard and accelerated curing through time-series surface resistivity measurements and change-point detection, Cem. Concr. Res. 148 (2021) 6–11. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106538.

[54] B. Cantero, M. Bravo, J. de Brito, I.F. Sáez del Bosque, C. Medina, Mechanical behaviour of structural concrete with ground recycled concrete cement and mixed recycled aggregate, J. Clean. Prod. 275 (2020). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122913.

[55] L. Likes, A. Markandeya, M.M. Haider, D. Bollinger, J.S. McCloy, S. Nassiri, Recycled concrete and brick powders as supplements to Portland cement for more sustainable concrete, J. Clean. Prod. 364 (2022) 132651. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132651.