PÓS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO TRATADOS COM CO_2: POTENCIAL DE USO COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR

Construction and Demolition Waste powder treated with CO_2: potential for use as supplementary cementitious materials

Kathleen Dall Bello de Souza Risson
Doutoranda no PPGIES-UNILA, Docente no IFPR | Foz do Iguaçu, PR | kathleen.souza@ifpr.edu.br
Melissa Pastorini Proença
Mestranda no PPGECI-UNILA, TAE no IFPR | Foz do Iguaçu, PR | melissa.proenca@ifpr.edu.br
Dayana Ruth Bola Oliveira
Pós-doutoranda no PPGECI-UNILA, Docente na UDC | dayruth@gmail.com
Victor Saldanha Cassel
Mestrando no PPGCI-UFRGS | Porto Alegre, RS | victorcassel@hotmail.com
Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Docente na UFRGS | Porto Alegre, RS | dmolin@ufrgs
Kátya Regina de Freitas Zara
Docente na UNILA | Foz do Iguaçu, PR | katya.freitas@unila.edu.br
Edna Possan
Docente na UNILA | Foz do Iguaçu, PR | edna.possan@unila.edu.br

Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar o uso dos pós reciclados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) tratados com CO_2 como Materiais Cimentícios Suplementares (MCS). Para isso utilizou-se o pó reciclado de concreto (PRC) e o pó reciclado misto (PRM), que foram levados à câmara de carbonatação por 48 h nas condições: 15% de CO_2, 20ºC e 70% de umidade, dando origem respectivamente aos pós PRC-48h e PRM-48h. Os pós foram caracterizados em relação à massa específica e a absorção de água. A captura de carbono devido à mineralização foi verificada por termogravimetria. Avaliou-se ainda a resistência à compressão de matrizes com 25% de pós (não tratados e tratados com CO_2) como substitutos ao cimento Portland. Verificou-se que o tratamento com CO_2 aumentou a massa específica e diminuiu a absorção de água dos pós reciclados de RCD, sem influenciar na resistência à compressão, quando utilizado como MCS. Além disso, a captura de CO_2 associado ao uso do pó como MCS, podem vir a contribuir para mitigar as emissões de carbono associadas à indústria cimenteira, além de ser uma alternativa à economia circular no setor da construção.

Palavras-chave: *Captura de CO_2; Carbonatação acelerada; Pó de concreto; Concreto reciclado; Economia circular.*

Abstract

This work aims to evaluate the use of recycled powders from Construction and Demolition Waste (CDW) treated with CO_2 as Supplementary Cementitious Materials (SCM). For this purpose, recycled concrete powder (PRC) and mixed recycled powder (PRM) were used, which were taken to the carbonation chamber for 48 h under the conditions: 15% CO2, 20ºC and 70% humidity, giving rise respectively to PRC-48h and PRM-48h powders. The powders were characterized in relation to specific mass and water absorption. Carbon capture due to mineralization was verified by thermogravimetry. The compressive strength of matrices with 25% powders (untreated and treated with CO_2) as substitutes for Portland cement was also evaluated. It was found that CO_2 treatment increased the specific mass and decreased the water absorption of recycled CDW powders without influencing the compressive strength when used as SCM. Furthermore, the capture of CO_2 associated with the use of powder as SCM may contribute to mitigating carbon emissions associated with the cement industry, in addition to being an alternative to the circular economy in the construction sector.

Keywords: *CO_2 capture; Accelerated carbonation; Concrete powder; Recycled concrete; Circular economy.*

INTRODUÇÃO

A indústria do cimento é responsável por, aproximadamente, 5% a 8% das emissões de dióxido de carbono (CO_2) e, em razão disso, estratégias como o uso de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) como substitutos parciais ao clínquer e a Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (em inglês *Carbon Capture, Utilization and Storage - CCUS*), se apresentam como uma das alternativas mais promissoras na mitigação destas emissões (GCCA, 2021).

Levando em consideração a composição química (CaO e Al_2O_3) dos pós (partículas < 0,15 mm) provenientes da reciclagem dos Resíduos da Construção e Demolição (RCD), este material pode ser uma possível alternativa de matéria-prima para a indústria do cimento e têm apresentado resultados promissores, como a redução do consumo de ligantes, das emissões de carbono, além de promover a circularidade na construção civil, pela valorização e reinserção dos pós na cadeia produtiva (OLIVEIRA et al., 2023).

Estudos sobre a mineralização do CO_2 em partículas (agregados reciclados e pós) de RCD tem sido cada vez mais abordado na literatura como forma de melhorar as características e capturar carbono (POON et al., 2023). Nesse sentido, considerando que a reação química entre o CO_2 e o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) produzem minerais carbonáticos ($CaCO_3$), preenchendo os poros da pasta de cimento endurecida (LI et al., 2022; LI; WU, 2022), diminuindo a porosidade e respectivamente a capacidade de absorção de água (SERENG et al., 2021; TORRENTI et al., 2022), este trabalho tem como objetivo avaliar o uso dos pós reciclados de RCD tratados com CO_2 como MCS.

2 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido conforme a Figura 1, onde considerou-se que a mineralização do CO_2 nos pós pode ser considerada como uma estratégia de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS).

Figura 1: Etapas do trabalho



Fonte: Autores

Os pós reciclados de RCD foram obtidos através da cominuição em máquina de Abrasão de Los Angeles, de corpos de prova de concreto, com diferentes composições e da areia reciclada mista, composta por 50,6% de fragmentos que apresentam pasta de cimento endurecida, 11,6% de fragmentos constituídos por rocha, 29,7% de fragmentos de cerâmica vermelha e 8,1% de materiais indesejáveis (solo, cerâmica branca esmaltada, matéria orgânica, gesso, etc.), determinados através da NBR 15116 (ABNT, 2021).

A fração obtida foi peneirada, e o material passante na peneira Mesh 100 (<0,15 mm) foi utilizado, gerando o Pó Reciclado de Concreto (PRC) e o Pó Reciclado Misto (PRM), que apresentaram respectivamente um diâmetro médio de partícula (D50) de 20,99 µm e 22,07 µm e um área de superfície específica por BET igual a 6,23 e 23,90 m²/g. A diferença da área de superfície específica pode ser explicada pela presença no PRM da caulinita, principal argilomineral verificado no solo da região (PEDROSO DIAS, 2022), que é constituído por cristais lamelares (COELHO; SANTOS; SANTOS, 2007) e que influenciam na porosidade dos grãos, tornando a área superficial (BET) maior. A composição química foi determinada por fluorescência de raios-X (FRX) em espectrômetro Rigaku modelo ZSX Primus IV, com tubo de Rh (Tabela 1).

Tabela 1: Composição química dos pós reciclados em porcentagem de óxidos

Siglas	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	SO_3	TiO_2	LOI
PRC	47,20	21,36	8,56	6,94	3,28	2,14	1,36	0,22	0,62	1,15	7,84
PRM	39,55	16,68	12,88	6,65	3,64	1,00	0,28	0,11	0,45	1,88	17,08

PF: Perda ao fogo; <LQ: abaixo do limite quantificável.

Fonte: Autores

A presença do dióxido de silício (SiO_2) e dos óxidos de cálcio (CaO), de ferro (Fe_2O_3) e de alumínio (Al_2O_3) na composição dos pós reciclados devem-se provavelmente aos compostos cimentícios hidratados (concretos, argamassas). O PMR apresenta um maior teor dos óxidos de alumínio devido à presença de materiais cerâmicos (tijolos, telhas), corroborando com a pesquisa de outros autores (FERREIRA et al., 2019; OLIVEIRA; DEZEN; POSSAN, 2020) e no caso do PRC o teor do óxido de ferro também se deve a presença do pó de pedra de origem basáltica na composição dos concretos (THOMAZ; MIYAJI; POSSAN, 2021).

2.2 TRATAMENTO POR CARBONATAÇÃO ACELERADA

O tratamento por carbonatação acelerada foi realizado após a imposição do teor de água de 6% em 250 g de pó, que foi armazenado em recipiente retangular com tampa por 24 horas, pois durante a reação principal de carbonatação, a água é necessária para desencadeá-la, a ausência de umidade inibe a reação, porém a saturação dos poros reduz a velocidade de difusão do gás (SERENG et al., 2021). Os pós foram dispostos em camadas de aproximadamente 20 mm na câmara climatizada da marca BASS, modelo UUC-RH-STD-CO2-1000/2016. Adotou-se a temperatura de 23 ± 2 ºC, umidade relativa de 60 ±10% (GAO et al., 2022) e taxa de CO_2 de 15% (150.000 ppm), que é a mesma concentração dos gases do forno de cimento (SERENG et al., 2021). Após 48 horas de exposição, os pós PRC-48h e PRM-48h foram secos (40ºC) por 48 horas e garantir a parada na hidratação(SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2016).

2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS PÓS

Os pós de referência (PRC e PRM) e os tratados com CO_2 (PRC-48h e PRM-48h) foram caracterizados fisicamente quanto à massa específica (triplicata) em picnômetro a gás (He), modelo Ultrapyc 5000, da Anton Paar, com pressão de operação 10 psi e pela absorção de água por evaporimetria no analisador termogravimétrico marca Percking Elmer, modelo STA 8000, considerando a teoria dos meios porosos (MECHLING; LECOMTE; MERRIAUX, 2003), no qual a água livre e a água absorvida não evaporam na mesma proporção. Adotou-se o protocolo: saturação a pressão atmosférica de 10 gramas de pó, saturação com água deionizada por 0,5h, leitura com rampa de 25 a 40ºC a 5ºC/min e depois uma isoterma na temperatura de 40ºC por 3 horas.

Verificou-se a mineralização do CO_2 nos pós através da diferença de massa entre os perfis termogravimétricos (TG-DTG) onde houve a decomposição do carbonato de cálcio (520ºC a 800ºC), conforme metodologia de NEVES JUNIOR et al.(2019). Utilizou-se o analisador termogravimétrico marca Percking Elmer, modelo STA 8000, com o protocolo: pré-tratamento isotérmico à 35 ºC durante uma hora, fluxo de nitrogênio de 30 ml.min-1, com intervalo de aquecimento de 30ºC a 1000 ºC e taxa de aquecimento de 10 ºC.min^{-1}(NEVES JUNIOR et al., 2013; SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2016).

2.4 USO DOS PÓS COMO MCS

Para avaliar o uso dos pós reciclados de RCD tratados com CO_2 como MCS, foram seguidos os procedimentos da NBR 7215 (ABNT, 2019), para o traço em massa 1:3 e com fator água/cimento fixado em 0,48, produziram-se 4 misturas, que tiveram 25% do cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI) substituído pelos pós de referência (não tratados) e tratados com CO_2. Moldaram-se 5 corpos de prova de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura por mistura, que foram conservados em atmosfera úmida para cura inicial (24h) e em seguida, desmoldados e submetidos à cura submersa em água saturada de cal até a data de ruptura (28 dias).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O tratamento dos pós reciclados de RCD com CO_2 promoveu (Figura 2), a elevação da massa específica (ρ) e a diminuição da absorção (Abs), indicativo de que houve o refinamento da estrutura dos poros devido a formação de $CaCO_3$ (POON et al., 2023). Conforme observado nos perfis termogravimétricos TG-DTG (Figura 3), verifica-se uma diminuição do pico de $Ca(OH)_2$ e um aumento do pico de $CaCO_3$, nas amostras tratadas com CO_2, sendo maior entre as amostras de pó reciclado de concreto (PRC e PRC-48h) devido ao teor de CaO superior em relação às amostras de pó reciclado misto (PRM e PRM-48h).

Verificou-se ainda que a captura do CO_2 no PRC foi de 15,5 kg de CO_2/ tonelada de pó e no PRM foi de 2,0 kg de CO2/ tonelada de pó, indicativo do potencial do tratamento como uma tecnologia CCUS. TORRENTI et al. (2022) usando um processo de carbonatação por laminação (tambor rotativo) confirmaram ser possível capturar entre 10 e 50 kg de CO_2/ tonelada de agregado reciclado de concreto (ARC). DOS REIS et al. (2020), verificaram que o uso de um tambor rotativo pode aumentar até 5 vezes a captura de carbono quando

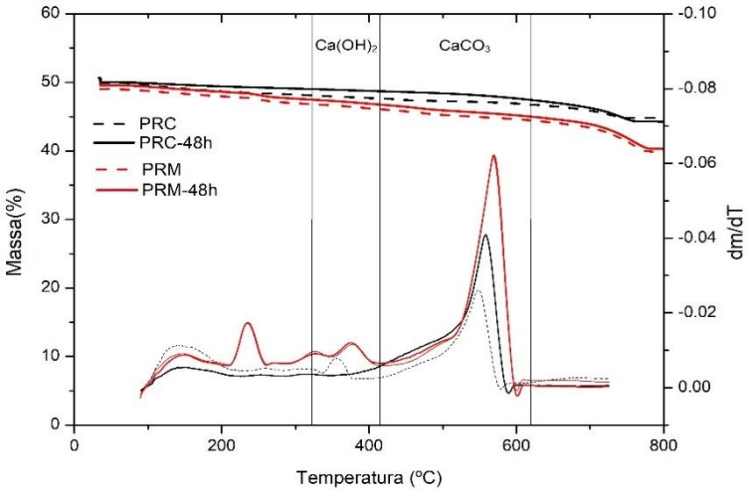
comparado ao método estático (câmara de carbonatação) em areias recicladas e que a carbonatação ocorre mais rápida em agregados de menor tamanho (DOS REIS et al., 2021). Assim, acredita-se que o tratamento dinâmico dos pós, combinado com outras granulometrias podem melhorar os resultados obtidos nessa pesquisa.

Figura 2: Características físicas dos pós

Siglas	ρ (g/cm³)	Abs (%)
PRC	2,68	10,3
PRC-48h	2,77	9,6
PRM	2,67	16,9
PRM-48h	2,72	15,9

Fonte: Autores

Figura 3: Perfis termogravimétricos TG-DTG

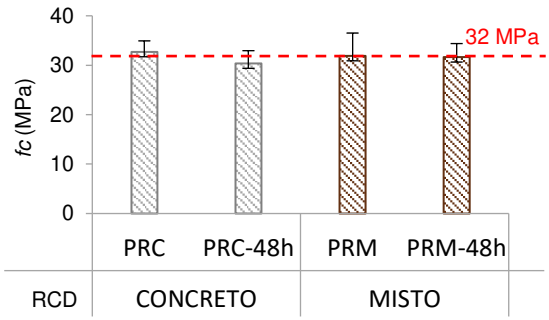


Fonte: Autores

Por fim, observa-se na Figura 4, que foram obtidos para a resistência à compressão aos 28 dias (*fc*) valores entre 30 e 33 MPa, próximo a classe de resistência de 32 MPa, o tratamento com CO_2, provocou uma diminuição na resistência de cerca de 7% para o PRC e 0,8% para o PRM, no entanto, de acordo com a análise de variância,– ANOVA e o Teste de Tukey, com um nível de significância igual a 0,05, os valores são estatisticamente iguais (p>0,05) (MANUEL AYREES; et al., 2007).

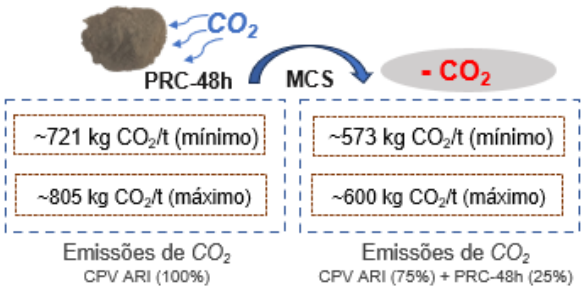
Assim, pode-se afirmar que é possível realizar a substituição de 25% do CPV ARI pelos pós tratados com CO_2, sem prejuízo a resistência à compressão aos 28 dias, e com a diminuição das emissões associadas ao clínquer, conforme Figura 5. Ressalta-se que, nesse trabalho a moagem foi utilizada somente para a obtenção de uma maior quantidade de material, e que os pós reciclados possuem composição química similar aos pós obtidos durante a britagem do RCD (ULSEN et al., 2010), por isso desconsiderou-se as emissões associados moagem e do transporte.

Figura 4: Resistência à compressão dos cimentos compostos por 25% de pó reciclado – NBR 7215



Fonte: Autores

Figura 5: Emissões de CO_2 por tonelada de clínquer considerando os limites e máximos para o CPV ARI*



* Emissões calculadas por OLIVEIRA (2023).

Fonte: Autores

4 CONCLUSÃO

O tratamento com CO_2, aumentou a massa específica e diminuiu a absorção de água dos pós reciclados de RCD, sem influenciar no desempenho mecânico (resistência à compressão), quando utilizado como MCS, substituindo 25% da massa do cimento Portland. Além disso, verificou-se que há potencial de captura de CO_2 através dos pós e que associado ao uso como MCS, podem vir a contribuir para mitigar as emissões de carbono associadas à indústria cimenteira, além de ser uma alternativa à economia circular no setor da construção.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas- ABNT. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinção da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 2021.

COELHO, A. C. V.; SANTOS, P. D. S.; SANTOS, H. D. S. **Special clays: Chemically modified clays - A review**. **Quimica Nova**, 2007.

DOS REIS, G. S. et al. Effect of the accelerated carbonation treatment on the recycled sand physicochemical characteristics through the rolling carbonation process. **Journal of CO2 Utilization**, v. 39, 1 jul. 2020.

DOS REIS, G. S. et al. Coupling of attrition and accelerated carbonation for CO2 sequestration in recycled concrete aggregates. **Cleaner Engineering and Technology**, v. DOS REIS, p. 100106, 2021.

GCCA. Concrete Future - The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete. **Global Cement and Concrete Association**, p. 1–48, 2021.

LI, L. et al. Mineralization and utilization of CO2 in construction and demolition wastes recycling for building materials: A systematic review of recycled concrete aggregate and recycled hardened cement powder. **Separation and Purification Technology**, v. 298, n. May, p. 121512, 2022.

LI, L.; WU, M. An overview of utilizing CO2for accelerated carbonation treatment in the concrete industry. **Journal of CO2 Utilization**, v. 60, n. March, p. 102000, 2022.

MANUEL AYREES; et al. **BioEstat 5.0 aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas.** Belém: IDSM, 2007.

MECHLING, J.-M.; LECOMTE, A.; MERRIAUX, K. Mesure de l'absorption d'eau des additions minérales des bétons par évaporométrie. **Materials and Structures**, v. 36, n. 1, p. 32–39, 2003.

NEVES JUNIOR, A. et al. Early stages hydration of high initial strength Portland cement: Part II. NCDTA and Vicat analysis. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 113, n. 2, p. 659–665, 2013.

NEVES JUNIOR, A. et al. Determination of CO2 capture during accelerated carbonation of engineered cementitious composite pastes by thermogravimetry. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 138, n. 1, p. 97–109, 2019.

OLIVEIRA, D. R. B. et al. Concrete powder waste as a substituition for Portland cement for environment-friendly cement production. **Ssrn**, p. 0–2, 2023.

OLIVEIRA, D. R. B. **Aproveitamento Da Fração Fina De Resíduo De Concreto Como Substituto Ao Cimento Portland**. Tese (doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2023.

PEDROSO DIAS, R. **Efeito Da Distribuição Granulométrica Em Cimentos Lc^3 Produzidos a Partir De Matérias-Primas Da Região De Foz Do Iguaçu-Pr**. Dissertação (mestrado), Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Integração Latino-Americana., 2022.

POON, C. S. et al. Total recycling of concrete waste using accelerated carbonation: A review. **Cement and Concrete Research**, v. 173, n. June, p. 107284, 2023.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. London: CRC Press - Taylor e Francis Group, 2016.

SERENG, M. et al. Improvement of recycled aggregates properties by means of CO2 uptake. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 14, 2021.

TORRENTI, J. M. et al. The FastCarb project : Taking advantage of the accelerated carbonation of recycled concrete aggregates. v. 17, n. July, 2022.

ULSEN, C. et al. Composição química de agregados mistos de resíduos de construção e demolição do Estado de São Paulo (Chemical composition of mixed construction and demolition recycled aggregates from the State of São Paulo). **Mineração**, v. 63, n. 2, p. 339–346, 2010.