



## POTENCIAL POZOLÂNICO DO RESÍDUO MISTO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO ATIVADO TERMICAMENTE: ENSAIOS FÍSICO-MECÂNICOS

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.6.23.VII-012>

Melissa Pastorini Proença (\*), Kathleen Ddall bello de Souza Risson, Dayana Ruth Bola Oliveira, Edna Possan

\* Universidade Federal da Integração Latino-Americana, e Instituto Federal do Paraná, melissa.proenca@ifpr.edu.br.

### RESUMO

Reduzir a emissão de gás carbônico, um dos gases do efeito estufa e responsáveis por diversos impactos ao clima ao longo de séculos, é uma preocupação mundial. Uma das estratégias adotadas pela indústria cimenteira, responsável pela emissão de cerca de 7% do CO<sub>2</sub> emitido globalmente é a utilização de materiais cimentícios suplementares (MCS) ao cimento. O pó reciclado oriundo da britagem de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) apresenta baixa atividade pozzolânica e para reutilizá-lo em argamassas e concretos diversos tratamentos vêm sendo estudados como forma de melhorar suas características. Nesse sentido, este estudo tem o objetivo de analisar o efeito da ativação térmica na atividade pozzolânica do pó misto de RCD (PM) para uso como MCS, por meio da calcinação por 0,5 (PM0,5) e 1,0 hora e (PM1,0). Fez-se a determinação da massa específica, área superficial, granulometria e atividade pozzolânica com cimento aos 28 dias e com a cal aos 7 dias, além da finura a partir do material retido na peneira 45 µm. Verificou-se que o tratamento térmico alterou as partículas promovendo aumento na massa específica e redução na área de superfície específica, com pequena redução no diâmetro médio das partículas tratadas. Quanto a atividade pozzolânica no índice de desempenho com cimento ocorreu melhoria proporcional ao período de calcinação, na análise de finura e na atividade com cal aos 7 dias os pós tratados não atingiram o requisito mínimo de norma para classificação como pozzolânicos. Diante dos resultados obtidos, especialmente no índice de desempenho com cimento, verifica-se que apesar de não ter atividade pozzolânica o material teve boa atuação na matriz cimentícia podendo seu melhor desempenho nesta análise estar associado a uma baixa reatividade somada ao efeito filler, um bom indicativo para continuidade de pesquisas quanto a sua aplicação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Termo ativação. Pó de RCD. Tratamento de partícula de RCD. Material cimentício suplementar. Finos.

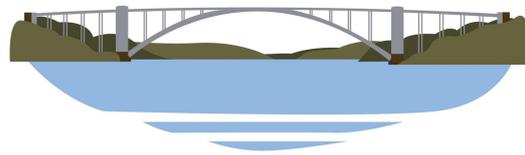
### ABSTRACT

Reducing carbon dioxide emission, one of the greenhouse gases responsible for several impacts on the climate over centuries is a worldwide concern. One of the strategies adopted by the cement industry, responsible for the emission of around 7% of the CO<sub>2</sub> emitted globally, is using supplementary cementitious materials (MCS) to cement. The recycled powder from the crushing of Construction and Demolition Waste (CDW) has low pozzolanic activity. Several treatments have been studied to improve its characteristics to reuse it in mortars and concrete. In this sense, this study aims to analyze the effect of thermal activation on the CDW pozzolanic activity mixed powder (PM) for use as MCS through calcination for 0.5 (PM0.5) and 1.0 hours (PM1.0). The specific mass, surface area, granulometry, and pozzolanic activity with cement at 28 days and with lime at seven days were estimated. In addition, the fineness of the material retained on the 45 µm sieve was determined. It verified that the thermal treatment altered the particles, promoting an increase in the specific mass and a reduction in the specific surface area, with a low reduction in the average diameter of the treated particles. As for the pozzolanic activity in the performance index with cement, there was an improvement proportional to the calcination period. In the fineness analysis and the activity with lime at seven days, the treated powders did not reach the minimum requirement of the norm for classification as pozzolanic. Because of the results obtained, especially in the performance index with cement, it appears that despite not having pozzolanic activity, the material had good performance in the cementitious matrix. Its best performance in this analysis may be associated with a low reactivity added to the filler effect, an excellent indicator for continuing research as to its application.

**KEY WORDS:** Term activation. CDW powder. CDW particle treatment. Additional cementitious material. Fines.

### INTRODUÇÃO

A geração e gestão dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) é uma das problemáticas enfrentadas pelo setor da construção, estima-se que no Brasil são gerados aproximadamente 100 milhões de toneladas de RCD por ano (1), compostos



majoritariamente por materiais de origem cerâmica (telhas, tijolos, revestimentos) e cimentícia (argamassas e concretos) (2), e que de acordo com a Resolução CONAMA nº 307 (3) devem ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, porém, na maioria das vezes são depositados de forma inadequada em aterros.

Outro impacto ambiental causado pela construção civil é a emissão de carbono, aproximadamente 7% das emissões de CO<sub>2</sub> no mundo se dá pela produção do cimento Portland, cerca de 60% dessas emissões, deve-se ao processo de obtenção do clínquer, onde ocorre descarbonatação da rocha calcária (4). Devido a isto surge a necessidade de mudança na composição química dos cimentos(5), a partir da diminuição do teor de clínquer e substituição por materiais cimentícios suplementares, que podem ter o efeito filer, de pozolana ou atuar como um material cimentante (5).

A normalização brasileira possibilita a substituição de até 25% de filer na composição dos cimentos, e 50% de pozolanas (6) sendo comumente utilizados resíduos de outros processos industriais como as escórias e cinzas volantes, que tem disponibilidade limitada, e por isso, o estudo de novos materiais é necessário (7). Neste cenário o pó de reciclagem de RCD (partículas menores que 0,15 mm), constituído principalmente por carbonato de cálcio e produtos da hidratação do cimento, sílica (cerâmicos), quartzo e dolomita (dos agregados), tem ganhado destaque como material substituto ao cimento Portland (8,9).

O grande desafio em utilizar o pó de RCD está em sua baixa atividade pozolânica, que é a capacidade de reação química entre as partículas silicosas ou silicoaluminosas e o hidróxido de cálcio da matriz cimentícia, e que forma o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional (10), refinando os poros e incrementando na maioria das vezes a durabilidade de obras executadas com esses materiais. Por isso diversos tratamentos, dentre eles a ativação térmica vem sendo estudada (8). A desidroxilação da fração argilosa pode formar uma estrutura amorfa (11), o que aumenta a reatividade, e na fração cimentícia há a formação de óxidos (8), que podem sofrer nova hidratação, atuando como agente cimentante. A reatividade é dependente da composição mineralógica do RCD (11).

Nesse sentido, visando promover a economia circular no setor da construção civil e reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> associados ao cimento com um material que é pouco utilizado, este estudo investiga o potencial pozolânico de um pó de RCD de origem mista ativado termicamente em forno mufla..

## OBJETIVO

Avaliar o potencial pozolânico com base nos requisitos físicos do pó de resíduo de construção e demolição misto (PM) após ativação térmica.

## METODOLOGIA

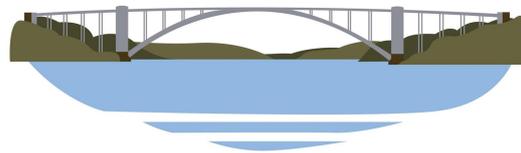
### Obtenção e Tratamento do Pó Misto de RCD

O pó misto (PM) foi obtido a partir da moagem da areia reciclada de resíduos de construção e demolição (seca), oriunda de usina de reciclagem da cidade de Cascavel-PR, que tem em sua composição materiais de origem cerâmica (tijolos, telhas, etc) e cimentícia (concreto, argamassa, etc). A areia reciclada passou por moagem em moinho de bolas (2 horas, com 24 esferas de aço), para maior geração da fração de pó (partícula menores que 0,15 mm), o qual foi separado por peneiramento. A Figura 1 representa o esquema de obtenção e tratamento térmico aplicado no pó misto de RCD.



Figura 1: Obtenção e tratamento do pó misto de RCD. Fonte: Autoras, 2023.

Utilizou-se a temperatura de 800 °C para ativação térmica do material, pois acima desta temperatura a fração de material argiloso pode formar fases menos reativas (11), e para a fração de resíduo cimentício em tal temperatura já ocorre à desidratação, aumentando a reatividade do material (12). Sendo os pós mantidos em forno mufla por períodos de 0,5 hora e 1 hora, respectivamente adotando-se a nomenclatura PM0,5 e PM1,0.



### Caracterização

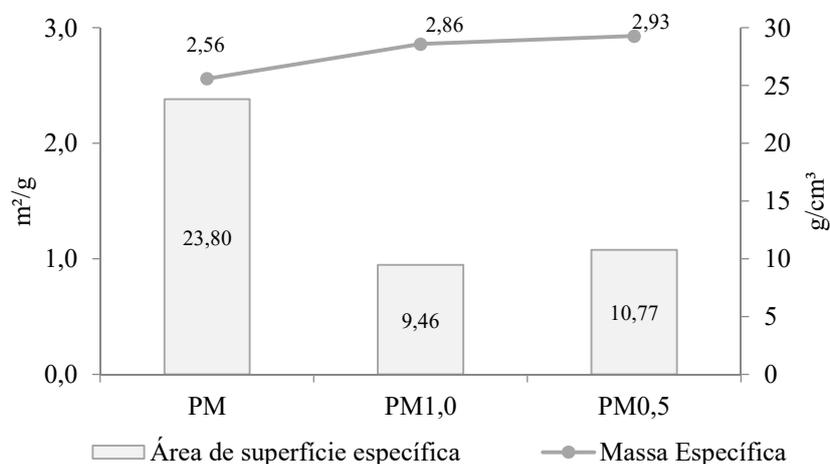
Para os pós PM, PM0,5 e PM1,0 foram realizados os ensaios de caracterização: massa específica pelo método do balão volumétrico e uso de álcool etílico PA, granulometria por difração de laser realizada no equipamento CILAS modelo 1190, aplicado como meio dispersante isopropanol e determinação da área de superfície específica através do modelo BET (Brunauer, Emmett e Teller) no equipamento Quantachrome NOVA 3200e, com amostras de aproximadamente 200 mg, sendo desgaseificadas com aplicação de vácuo por 16 horas à 40 °C.

### Potencial pozolânico

Para verificação do potencial pozolânico dos pós conforme NBR 12653:2014 foram realizados os ensaios físico-mecânicos: índice de desempenho com cimento aos 28 dias conforme NBR 5752: 2014, atividade pozolânica com cal aos 7 dias NBR 5751: 2015 e análise de finura a partir do material retido na peneira 45 µm, conforme NBR 15894-3: 2010. Realizou-se a análise de variância estatística dos resultados obtidos utilizando-se o Teste Tukey considerando nível de significância de 5%.

### RESULTADOS

Verificou-se (Figura 2) que termoativação promove um aumento da massa específica do material em 11,72% e 14,45% para o período de 1,0 e 0,5 hora respectivamente. Para a área de superfície específica os pós calcinados ficaram com valores próximos a 10 g/cm<sup>2</sup>, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 42% na área de superfície específica do PM, ambas propriedades são importantes principalmente em termos de aplicação da fração de pó, uma massa específica com valores mais próximos ao do cimento Portland é interessante para estudos envolvendo a substituição, assim como uma redução na área de superfície específica pode contribuir na redução dos problemas relacionados a absorção excessiva dos pós de RCD.



**Figura 2: Massa específica e área de superfície específica PM ativado. Fonte: Autoras, 2023.**

As curvas granulométricas do PM0,5 e PM1,0 encontram-se praticamente sobrepostas, observa-se (Figura 3) que a calcinação eleva a quantidade de partículas inferiores a 10 µm quando compara-se ao PM, onde a curva passa a verticalizar-se após este valor, verifica-se que ocorre uma pequena redução nos diâmetros médios dos pós tratados. O aumento no tamanho médio de partículas foi observado por ZHANG et al., (2022) (12) em tratamento de pós de concreto, principalmente em temperatura de 800 °C, fato que se deve a perda de água física e quimicamente ligada (desidratação) que tende a promover a aglomeração das partículas no tratamento térmico, também o aumento de volume deve-se a mudança de α- e β-quartzo nesta faixa de temperatura (12). O que justificaria um aumento na massa específica das partículas e redução da área de superfície específica.

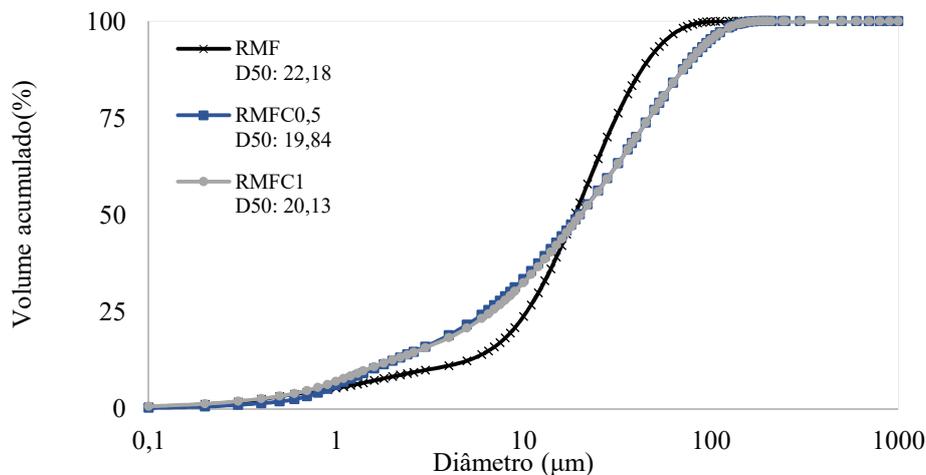
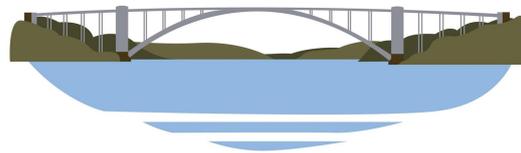


Figura 3: Curvas granulométricas. Fonte: Autoras, 2023.

Observa-se (Figura 4) que a ativação térmica promoveu uma melhora ao PM (1,45 MPa) de 73% (2,51 MPa) e 84% (2,68 MPa) para PM0,5 e PM1,0 respectivamente, na atividade com cal aos 7 dias, proporcional ao período de calcinação, porém nenhuma das amostras atingiu o requisito mínimo de 6 MPa conforme a NBR 12653 (13), e na ANOVA verificou-se que não há diferença significativa entre os períodos de ativação térmica. Para uma maior reatividade da fração argilosa deve-se garantir a máxima desidroxilação do material e a ativação térmica permite a transição de uma fase puramente cristalina para um estado mais amorfo, isto em temperaturas abaixo de 900 °C, onde o material recrystaliza e perde atividade (11), também a desidratando da fração cimentícia (12). Brekailo et al., (2019) em estudo utilizando a fração de material cerâmico e de concreto pré-tratada por moagem de 30 minutos e separado o pó passante na peneira de abertura de malha de 0,075 mm, obtiveram para o pó cerâmico 6,6 MPa, e para o pó de concreto 1,1 MPa, sendo a fração cerâmica com maior tendência a ter reatividade com cal (14) corroborando com os resultados de Oliveira (2023) com pós cerâmicos, obteve atividade com cal de 5,53 MPa para o material passante na malha de 0,150 mm e 5,16 MPa para o material cerâmico calcinado por 3 horas a 800 °C, ademais a autora obteve valores inferiores a 1,6 MPa para o pó misto termicamente tratado, e 0,49 MPa para o pó de concreto tratado por cominuição (15). Ferreira (2016) com o pó (<0,15 mm) de agregados de RCD obteve atividade com cal de 7 MPa, tendo o mesmo material atendido aos requisitos químicos da NBR 12653 para ser caracterizado como pozolana (16).

O PM sem tratamento apresentou índice de desempenho com cimento de 93%, a calcinação promoveu melhora neste índice passando para 111% e 115% para os períodos de ativação de 0,5 e 1,0 hora respectivamente, todos os valores são superiores ao mínimo de 90% requisito da NBR 12653: 2014 para o material pozolânico, observou-se a partir da ANOVA não haver diferença significativa entre PM e PM0,5, e também entre PM0,5 e PM1,0. No índice de desempenho com cimento Brekailo et al., (2019) obteve 87% e 77,62% para o pó cerâmico e pó de concreto respectivamente (14), sendo o segundo valor próximo ao de Ferreira (2016) de 76,81% para o pó de RCD (16). Oliveira (2023) encontrou para o índice de desempenho com cimento no pó de concreto valores inferiores a 69,48%, no pó misto termicamente ativado inferiores a 68,44% e no pó cerâmico termicamente ativado inferiores a 58,91% (15). Verifica-se que o índice de desempenho com cimento é independente da atividade com cal, que está mais relacionada à composição química do material, possivelmente o PM, apresenta uma baixa atividade pozolânica, podendo ter efeitos de filler ou de material cimentante o que fez com que apresentasse bom desempenho (superior a 90%, requisito da NBR 12653) com cimento aos 28 dias, enquanto que a atividade com cal aos 7 dias os resultados não atingiram o mínimo de 6 MPa, possivelmente relacionado a quantidade de silicatos amorfos com potencial de reagir com o hidróxido de cálcio, necessitando de estudos químicos para confirmação, observa-se que a termoativação resultou em uma pequena alteração na atividade com cal, possivelmente em virtude da desidroxilação da fração argilosa na composição do pó misto, e formação de óxidos com potencial de hidratação.

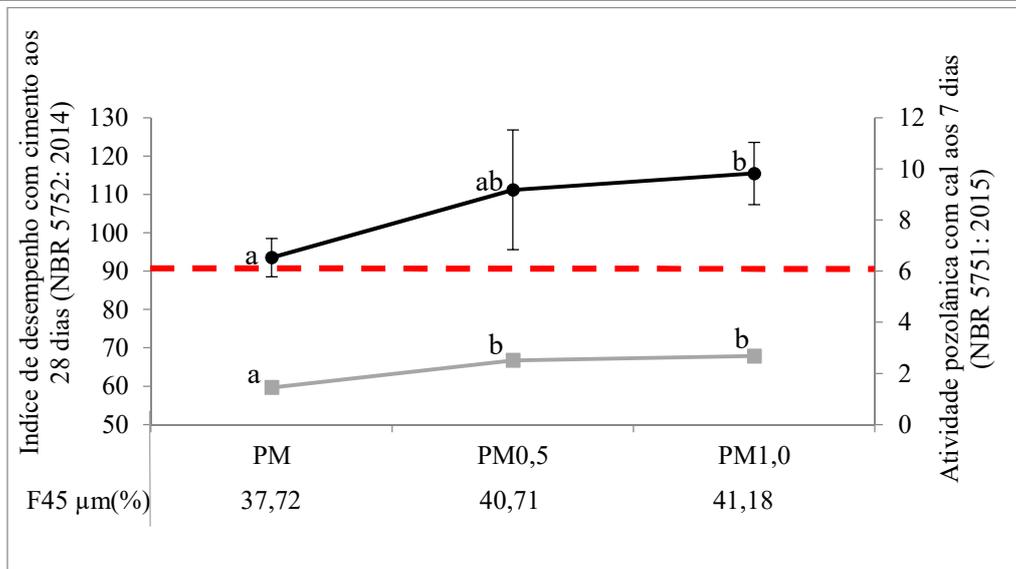
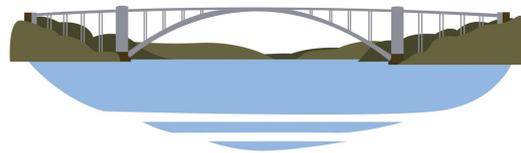


Figura 4: IAP PM ativado termicamente. Fonte: Autoras, 2023.

Quanto ao material retido na malha 45 µm, o requisito da NBR 12653: 2014 (13) é inferior a 20%, e a termoativação do pó misto resultou em um aumento no material retido, deste modo, nenhum dos pós atendeu este parâmetro físico normativo para classificação como material pozolânico.

Verifica-se que a termoativação melhora o índice de desempenho com cimento, possivelmente por reduzir a área de superfície específica do material, e ao mesmo tempo aumentar a densidade de massa do PM, além disto a termoativação promove alteração química deixando o material mais reativo, ainda que não atenda ao requisito normativo de atividade com cal aos 7 dias e material retido na malha de 45 µm, observa-se o potencial do PM ativado termicamente ser utilizado como material cimentício suplementar atuando através de uma baixa reatividade, efeito filer e possivelmente como material cimentante, conforme relatado por Oliveira et al.(17).

## CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Quanto as características do pó misto de resíduos de construção e demolição (PM) após ativação térmica, verificou-se um aumento na massa específica do material, também ocorreu redução da área de superfície específica, e uma pequena redução no diâmetro médio das partículas, ambos os efeitos podem estar relacionados a aglomeração promovida pelo tratamento térmico nas partículas, com a perda de água combinada e ainda a mudanças nas fases cristalinas do pó.

O tratamento térmico aumentou o material retido na malha de 45 µm o que não o enquadra como pozolânico neste requisito da NBR 12653: 2014, porém isto é consequência do tratamento que melhorou o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, e isto deve-se a desidroxilação da fração argilosa na composição do pó e desidratação, descarbonatação da fração cimentícia, quanto a atividade com cal a pequena melhora nesta propriedade com o maior período de ativação térmica é indicativo da alteração química promovida no PM, ainda que nesta análise não atenda ao requisito de norma.

Verifica-se que o tratamento térmico foi favorável principalmente no índice de desempenho com cimento, trazendo um bom indicativo para futuros estudos quanto à aplicação deste pó ativado em substituições parciais do cimento Portland.

Também mostrando indícios da melhora potencial de reatividade após ativação térmica, com base nos resultados obtidos pode-se concluir que o período de 0,5 horas de termoativação é suficiente para alteração das características do PM e melhora de sua reatividade. Como o índice de desempenho com cimento foi a propriedade com resultados positivos, quanto aos requisitos físicos de pozolanicidade, e para esta propriedade o PM sem tratamento térmico já apresentou índice superior a 90%, é necessário estudo quanto a viabilidade do tratamento térmico na aplicação do material, visto os efeitos promovidos quando na composição de matriz cimentícia, sendo sugerido analisar o desempenho da substituição de cimento Portland pelos materiais visto que atuam sob o efeito filer, e uma baixa reatividade.

Esta pesquisa será continuada com a análise ambiental quanto ao tratamento aplicado ao pó de RCD e o potencial de aplicação em substituição ao cimento Portland. Sugere-se para estudos futuros a investigação de outros períodos e temperaturas de calcinação.



### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABRECON, **Pesquisa setorial ABRECON 2020: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil**. 104 p. Organizadores: S. C. Ângulo; L. S. Oliveira; L. Machado. São Paulo: Epusp, 2022.
- [2] A.N. MATIAS, **Resíduos De Construção E Demolição À Luz Da Política Nacional De Resíduos Sólidos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Integração Latino-Americana, 2020.
- [3] CONAMA(Conselho Nacional do Meio Ambiente). **RESOLUÇÃO N° 307, DE 5 DE JULHO DE 2002**. 2002 p. 95–6.
- [4] 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>.
- [5] K.L. Scrivener, V.M. John, E.M. Gartner, Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry, **Cem. Concr. Res.** 114 (2018) 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16697 Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.
- [7] K. Scrivener, F. Martirena, S. Bishnoi, S. Maity, Calcined clay limestone cements (LC3), **Cem. Concr. Res.** 114 (2018) 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>.
- [8] H. Wu, J. Xu, D. Yang, Z. Ma, Utilizing thermal activation treatment to improve the properties of waste cementitious powder and its newmade cementitious materials, **J. Clean. Prod.** 322 (2021) 129074. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129074>.
- [9] T. C. F. Oliveira, B. G.S. Dezen, E. Possan. Use of concrete fine fraction waste as a replacement of Portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, p. 123126, 2020.
- [10] A.M. Neville. **Propriedades do concreto**. 5ª Edição, Bookman, Porto Alegre, 2016.
- [11] S. Mohammed, Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: A review, **Constr. Build. Mater.** 140 (2017) 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.078>.
- [12] D. Zhang, S. Zhang, B. Huang, Q. Yang, J. Li, Comparison of mechanical, chemical, and thermal activation methods on the utilisation of recycled concrete powder from construction and demolition waste, **J. Build. Eng.** 61 (2022) 105295. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105295>.
- [13] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12653 Materiais pozolânicos — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.
- [14] 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>.
- [15] D.R.B. Oliveira, **Aproveitamento Da Fração Fina De Resíduo De Concreto Como Substituto Ao Cimento Portland**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, 2023.
- [16] R. Ferreira, C. H. R. B. Silva, A. K. C. Nobrega, M. A. S. Anjos, J. E. S. Pereira, G. B. Bruno, A. W. B. Silva. Estudo da atividade pozolânica dos finos (< 0,15 mm) de agregados reciclados provenientes de resíduo de construção e demolição. **Anais... II Congresso Luso-brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis**. João Pessoa, 2016.
- [17] D. R. B. Oliveira, M. P. Proenca. E. Possan. ; J. Marques Filho, Pó de resíduo misto de construção como material cimentício suplementar: estudo em pastas empacotadas. **Anais... XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2022, Canela. ENTAC 2022**. Porto Alegre: ANTAC, 2022. v. 1. p. 1-14.