

PROPOSIÇÃO DE CRITÉRIOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO E SUAS IMPLICAÇÕES

Dobrovolski, Emilin Regina Meira; Sartori, Bruna Eduarda; Kruger, Patricia

¹ Mestre em engenharia sanitária e ambiental, Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), ergomes@uepg.br

² Acadêmica de engenharia civil, UEPG, bruna.eduarda.sartori@gmail.com

³ Doutora em engenharia e ciência dos materiais, UEPG, pkruiger@uepg.br

Resumo: A construção civil é um setor de alta demanda por recursos naturais, responsável por cerca de 50% dos materiais extraídos globalmente e gerador de expressivas quantidades de resíduos. O reaproveitamento de resíduos de construção e demolição (RCD), especialmente os agregados reciclados de concreto (ARCO), representa uma alternativa sustentável. No entanto, limitações físico-químicas desses materiais, como alta porosidade e presença de argamassa aderida, dificultam seu uso em concretos estruturais. Este estudo propõe diretrizes de classificação do ARCO com base na resistência do concreto de origem, visando estabelecer uma relação entre propriedades do material original e as características do agregado reciclado. Foram realizados ensaios físicos e análises químicas e microestruturais. Os resultados físicos não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre as classes, embora os ARCOs de concretos com 40 MPa tenham indicado melhor desempenho físico, com uma absorção 13,45% menor que o ARCO de 25MPa. Por outro lado, análises químicas de FRX e DRX revelaram variações relevantes no grau de hidratação do cimento, sugerindo viabilidade da proposta. Conclui-se que a resistência do concreto de origem pode ser um critério válido para a classificação de ARCO, demandando, entretanto, aprofundamento experimental para consolidação da metodologia.

Palavras-chave: Agregado reciclado, Propriedades, Classificação

Abstract: The construction industry is a major consumer of natural resources, accounting for approximately 50% of globally extracted materials and generating significant volumes of waste. The reuse of construction and demolition waste (CDW), particularly recycled concrete aggregates (RCA), represents a sustainable alternative. However, physical and chemical limitations — such as high porosity and adhered mortar — restrict its application in structural concrete. This study proposes a classification guideline for RCA based on the compressive strength of the source concrete, aiming to correlate the origin material with the recycled aggregate's properties. Physical tests and chemical/microstructural analyses were performed. Physical parameters showed no statistically significant differences among groups, although RCAs from 40 MPa concrete displayed slightly superior performance, with an absorption rate 13.45% lower than the 25MPa RCA. In contrast, XRF and XRD chemical analyses revealed notable differences in cement hydration levels, indicating the presence of portlandite and higher calcium-to-silicate ratios in higher-strength samples. These findings suggest that the original concrete strength can be a valid criterion for RCA classification, though further large-scale experimental validation is needed to consolidate the methodology.

Keywords: Recycles aggregate, Properties, Classification

1. Introdução

A construção civil é um dos setores mais impactantes em termos de consumo de recursos naturais e geração de resíduos. Estima-se que aproximadamente 50% dos materiais extraídos globalmente são destinados a esse setor, e apenas no ano de 2022, foram gerados mais de 45 milhões de toneladas de resíduos no Brasil [1 - 2]. Nesse contexto, o aproveitamento de resíduos de construção e demolição (RCD) surge como estratégia relevante para mitigar esses impactos, com destaque para os agregados reciclados de concreto (ARCO), obtidos pela reciclagem dos resíduos de estruturas de concreto [3].

Apesar do potencial de contribuição para a sustentabilidade, o uso de ARCO em concretos estruturais é limitado por características físico-químicas desfavoráveis em relação aos agregados naturais [3]. Conforme os autores, entre os principais fatores que comprometem sua aplicação, destacam-se a elevada porosidade, a presença de argamassa residual aderida aos grãos e a heterogeneidade dos constituintes. Essas características afetam diretamente parâmetros como densidade, absorção de água e índice de vazios; os quais influenciam a aplicabilidade do material, principalmente devido à interferência na aderência com a matriz cimentícia e na coesão interna do concreto que utilizem ARCO [4].

Desse modo, o uso de agregados reciclados principalmente em fins nobres, como concretos estruturais, necessita de critérios bem estabelecidos, devido a variabilidade na composição do material [4 - 5]. Conforme a própria norma brasileira de uso de ARCO em concretos estruturais NBR 15116 [6], há uma classificação que define critérios de composição do agregado reciclado, em que a classe A, referente ao agregado graúdo de resíduo de concreto, composta por pelo menos 90% de material cimentício e rochoso, é o mais indicado para uso. Porém, a norma ainda é generalista no quesito de composição do concreto que origina o ARCO (como teor e tipo de cimento), e presença de argamassa aderida ao grão, o que também pode levar mudanças nas propriedades do material tidos como a mesma classe [7].

A partir disso, o objetivo desse estudo é propor diretrizes de classificação de agregado reciclado baseadas nos critérios de resistências do concreto de origem, que traduz características físico-químicas mensuráveis, de modo a facilitar a viabilização do uso do ARCO em concretos. Essa proposta inicia na escolha das diretrizes, fundamentada nas recomendações de normas de projeto de estruturas de concreto, e passa pela caracterização físico-química, visando identificar padrões e diferenças dentro das classes propostas, verificando a viabilidade da proposição. Esse tipo de proposição traz avanços no uso do material reciclado dentro da construção, identificando possibilidades de classificação mais assertivas em materiais que possuem uma natureza heterogênea, facilitando o direcionamento do seu uso.

2. Metodologia

2.1 Materiais

Primeiramente, para esse estudo, foram analisados quatro tratamentos, identificados como a resistência do concreto de origem do ARCO, a diretriz proposta para a classificação do ARCO. Para isso, foram selecionados concretos com faixa de resistência característica à compressão aos 28 dias entre 25 MPa, 30 MPa, 35 MPa, e 40 MPa, fundamentadas nas recomendações técnicas de projetos de estruturas de concreto convencionais advindas da NBR 6118 [8]. Essa escolha foi realizada justamente para identificar se existem diferenças nas características físicas, químicas e microestruturais entre os agregados reciclados oriundos de concretos com resistências diferentes, indicando a possibilidade de uso de classificações de ARCO a partir de características de origem do material.

O agregado reciclado foi produzido na Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), a partir de corpos de prova de concreto advindos do serviço de controle tecnológico de concreto prestado pelo Laboratório de Materiais de Construção da UEPG à comunidade externa, cuja resistência característica aos 28 dias já tivesse sido determinada por meio de ensaios de compressão axial. Esses corpos de prova foram submetidos ao processo de britagem, e sua seleção granulométrica foi definida entre 4,8 mm e 9,5 mm, realizada por peneiramento manual. Foram seguidas as recomendações do processo de quarteamento da NBR 16915 [9] para a amostragem do material.

2.2 Métodos de caracterização

Para a proposta de classificação de ARCO a partir da resistência à compressão do concreto de origem, foram realizados ensaios de caracterização física para identificação de possíveis diferenças entre os materiais, dentre eles, absorção de água por imersão conforme NBR 16917 [10], e massa unitária e índice de vazios conforme NBR 16972 [11]. Além desses, também foi realizada a determinação da massa específica por picnômetro de gás Hélio, no Quantachrome Ultrapycnometer 1000. Para as análises de propriedades físicas, foram realizadas cinco repetições para cada tratamento, exceto para a análise de massa unitária. Além disso, foi realizado o teste estatístico de Kruskal-Wallis para amostras sem distribuição normal com significância de 5% para verificação de diferenças entre as médias dos dados obtidos.

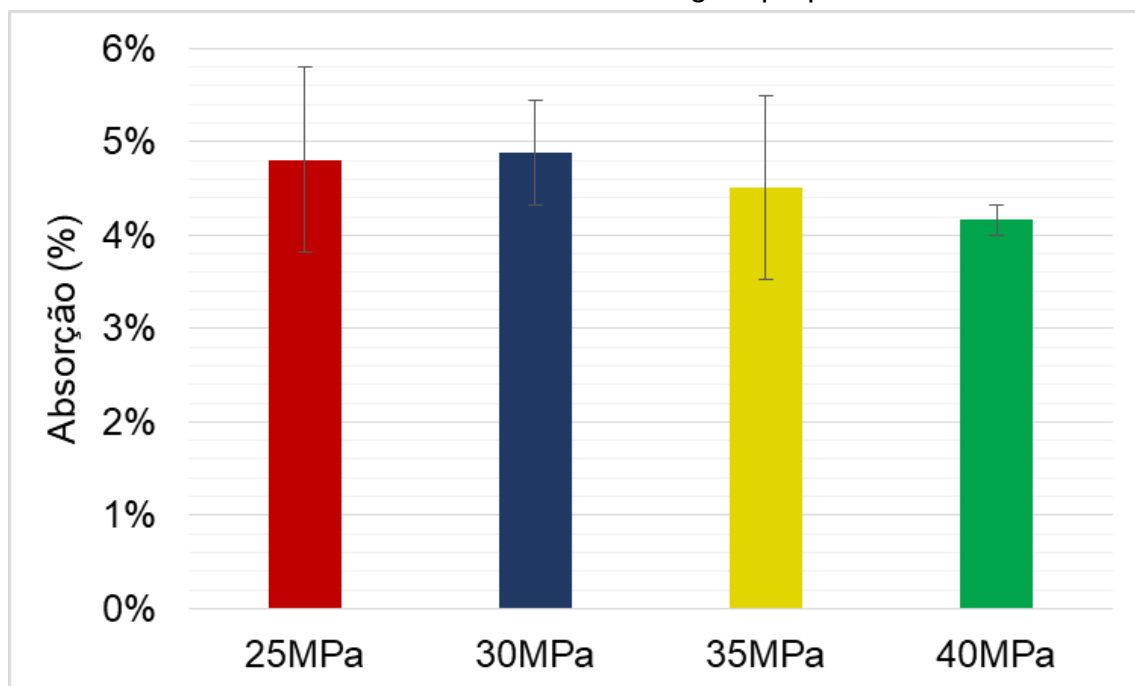
Também foram realizados ensaios de caracterização química e microestrutural de fluorescência de raios X (FRX), com o espectômetro EDX-700 da Shimadzu, e de difração de raios X (DRX), com o difratômetro Ultima IV da Rigaku em análise contínua, do intervalo de varredura de 5° a 75°, com passo de 0,02°, à 30°/min, onde a radiação adotada foi de 30 kV/10 mA. Para as análises de FRX foi realizada uma única repetição para cada tratamento, e para as análises de DRX foram realizadas três repetições.

3. Resultados

Os parâmetros físicos analisados das amostras de ARCO classificadas a partir da resistência de origem estão apresentados a seguir, dentre eles, absorção por imersão (Figura 1), massa unitária (Figura 2), índice de vazios (Figura 3), e densidade por picnometria de hélio (Figura 4). A partir das informações apresentadas, os agregados oriundos de concreto com 40MPa apresentaram absorção 14,90% menor que o agregado de 30MPa. Apesar disso, por meio das referências aos testes de Kruskal-Wallis apresentadas em conjunto com as imagens, não foi possível observar diferenças estatisticamente significativas entre os resultados de absorção, massa unitária e índice de vazios das diferentes classes de agregado reciclado, devido ao desvio dos dados observados.

Além disso, os resultados que apresentaram diferenças significativas observadas a partir dos testes estatísticos foram as análises de densidade, onde os agregados com maiores densidade foram aqueles oriundos de concreto de menores resistências, em que o ARCO de 25MPa apresentou densidade 5,27% maior que o ARCO de 30MPa e 40MPa. Assim, por meio dessas informações é possível notar que as propriedades físicas do agregado reciclado não seguem uma tendência clara de influência advinda do concreto de origem do ARCO. Isso pode ocorrer devido ao fato de que dentro da proposta de classificação dos agregados há muita variabilidade na composição do concreto de origem, como diferentes tipos de cimento e agregados, também observado em outros estudos [12], podendo levar ao maior desvio das propriedades.

Figura 1: Absorção do agregado reciclado de concreto a partir da classificação da resistência do concreto de origem proposta



Nota: Todas as amostras apresentaram valores estatisticamente semelhantes (p-value>0,05)

Figura 2 : Massa unitária do agregado reciclado de concreto a partir da classificação da resistência do concreto de origem proposta

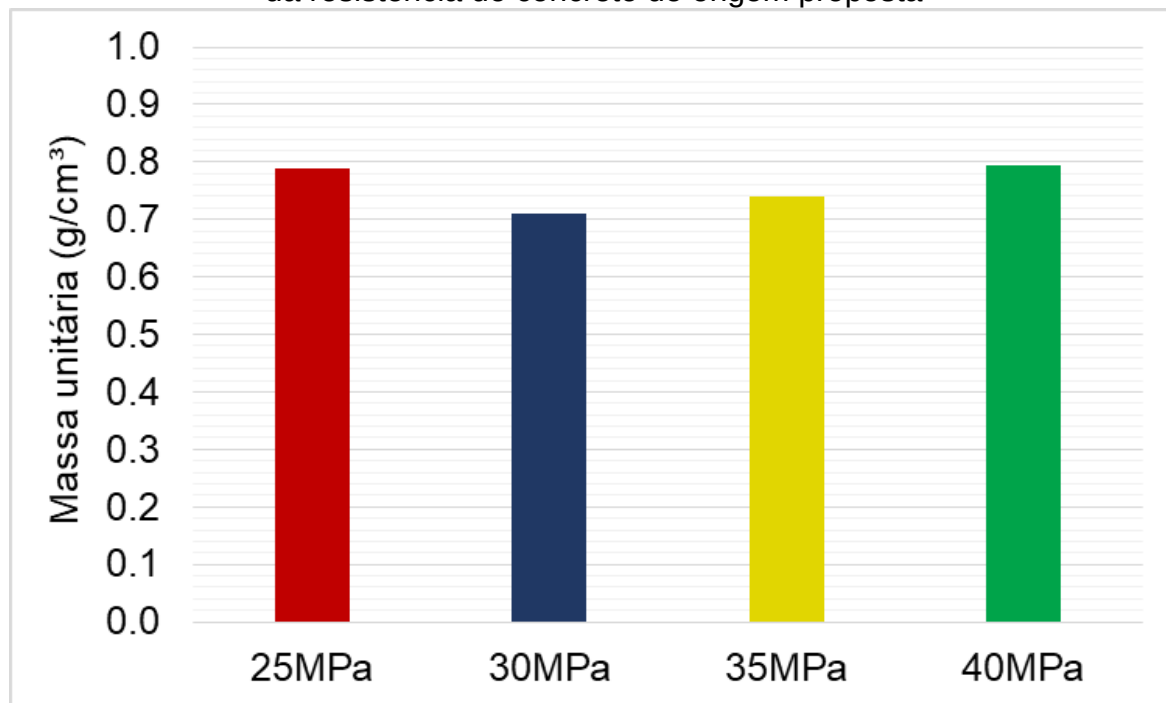
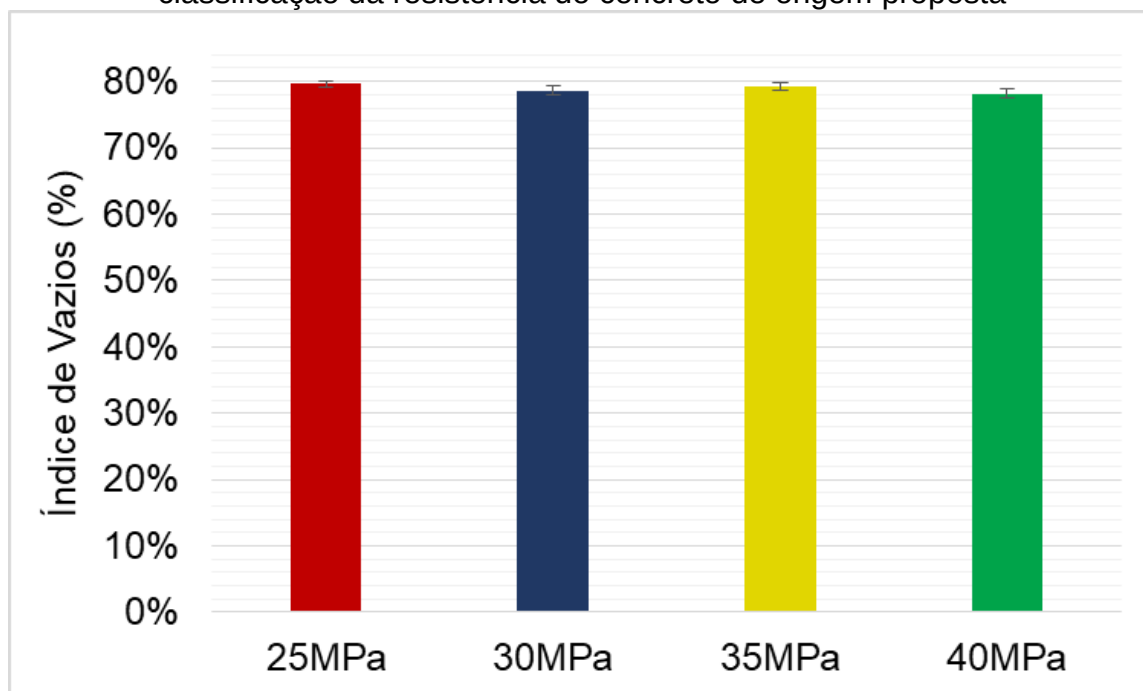
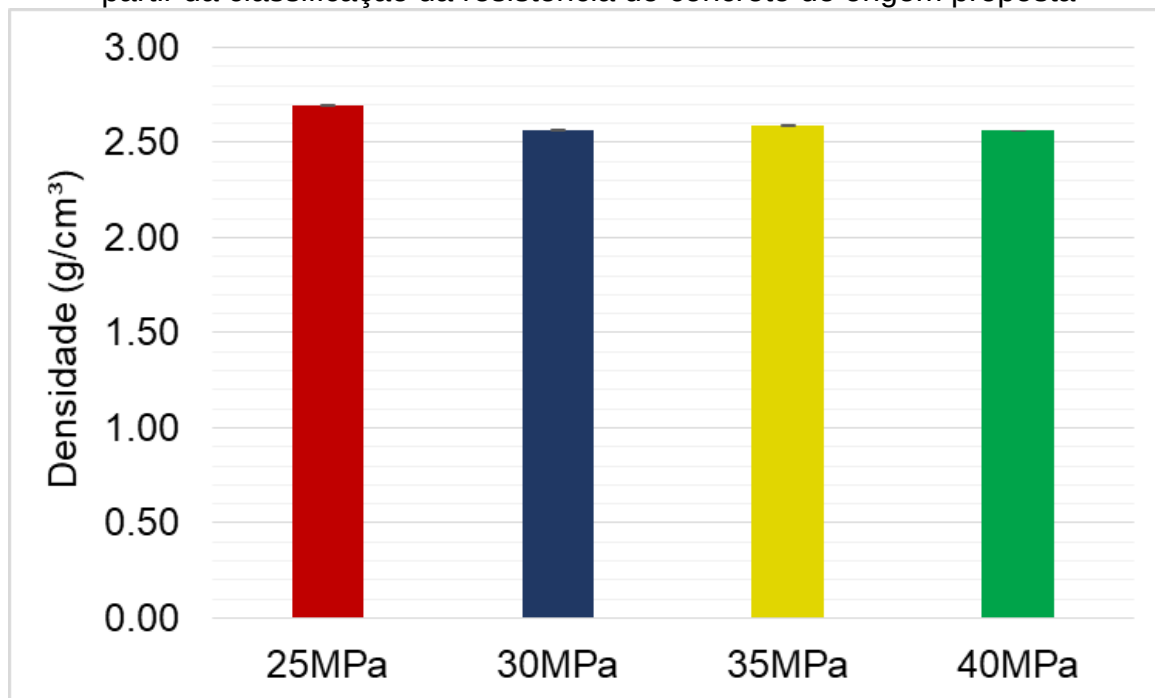


Figura 3: Índice de vazios do agregado reciclado de concreto a partir da classificação da resistência do concreto de origem proposta



Nota: Todas as amostras apresentaram valores estatisticamente semelhantes (p-value>0,05)

Figura 4: Densidade com picnômetro de hélio do agregado reciclado de concreto a partir da classificação da resistência do concreto de origem proposta

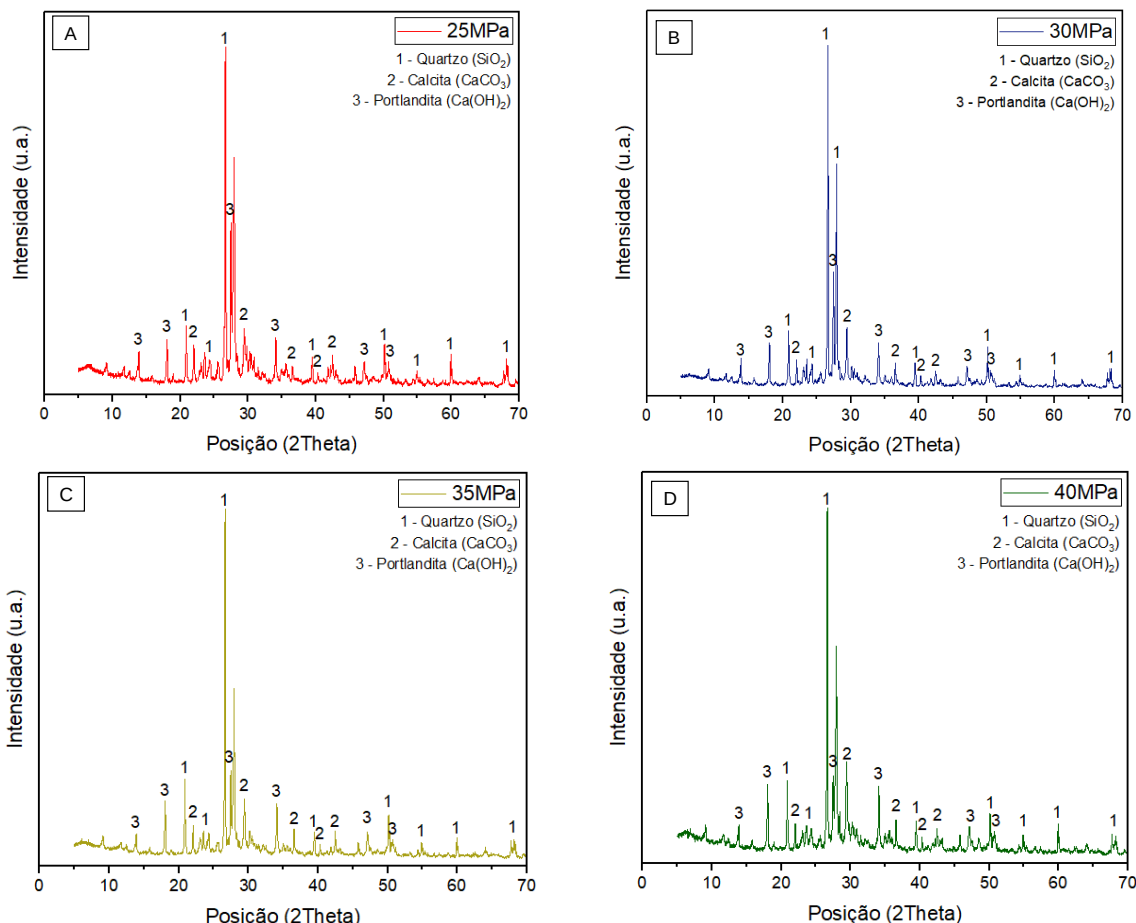


Nota: As amostras de 25MPa e 35MPa apresentaram diferenças significativas das demais amostras. Já os agregados de 30MPa e 40MPa se mostraram estatisticamente semelhantes entre si.

Já com relação às características químicas, foram realizadas análises de DRX separadas por resistência do concreto de origem do ARCO (Figura 5), e análises de FRX (Tabela 1). Baseado nesses dados, é possível notar maiores presenças de compostos hidratados de cimento nos agregados oriundos de concreto de 40MPa, e menor presença nos agregados de menores resistência, conforme proporção dos picos de Portlandita (CaOH_2) no DRX, observada pelo pico característico aos $34,07^\circ$. Um comportamento semelhante a esse também foi observado por Zajac *et al.* [13], onde foram observadas mudanças nas propriedades do agregado reciclado conforme o grau de hidratação do cimento presente na argamassa aderida ao grão. Conforme os autores, a maior presença de Portlandita indica maior grau de hidratação do cimento, podendo levar a diminuição do volume de poros do material [13]

Além disso, também é possível identificar uma alta razão entre óxidos de cálcio e silicatos observadas na análise de FRX nas amostras de 40MPa, e há uma diminuição dessa razão conforme diminui a resistência à compressão do concreto de origem do ARCO. Zajac *et al.* [13] também observaram um comportamento semelhante a esse em amostras com maior grau de hidratação, indicando que relações baixas entre óxido de cálcio e silicatos ($\text{Ca/Si} < 1,5$) levam a maior presença de alita (C_3S) e belita (C_2S), cristais de cimento anidro; e menor formação de silicatos de cálcio hidratados amorfo (C-S-H). Esse tipo de comportamento pode indicar maior presença de vazios nos grãos de ARCO de concretos com menor grau de hidratação [13].

Figura 5: Difração de raios X do agregado reciclado de concreto a partir da classificação da resistência do concreto de origem proposta



Nota: A – ARCO oriundo de concreto de 25MPa; B – ARCO oriundo de concreto de 25MPa; C – ARCO oriundo de concreto de 35MPa; D – ARCO oriundo de concreto de 40MPa.

Tabela 1: Fluorescência de raios X do agregado reciclado de concreto a partir da classificação da resistência do concreto de origem proposta

Faixa de resistência	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)
25MPa	36,873	36,851	11,311	7,965	2,847
30MPa	35,611	45,601	9,126	4,525	3,429
35MPa	35,315	44,449	9,981	5,020	3,118
40MPa	31,937	46,072	9,594	7,788	2,115

Assim, os resultados das análises microestruturais indicam que existem diferenças no processo de hidratação da pasta de cimento aderida ao grão do agregado reciclado conforme a variação da resistência característica à compressão do concreto de origem. Apesar disso, os dados de caracterização física denotaram maior variabilidade na absorção e densidade do material conforme a mudança da resistência de origem do

ARCO, não podendo ser realizada a correlação direta entre essas características e a categorização do ARCO por resistência. Logo, é possível identificar diferenças no processo de hidratação da pasta de cimento aderida ao grão do agregado reciclado, que se mostra como algo promissor no quesito de classificação do ARCO proposta nesse estudo, porém, a alta variabilidade na composição do concreto de origem pode dificultar esse processo de categorização.

4. Conclusões

A partir das análises realizadas, foi possível identificar que as diretrizes propostas para classificação do agregado reciclado de concreto, baseadas na resistência característica à compressão aos 28 dias do concreto de origem do ARCO, mostraram efeitos promissores sobre as características do agregado reciclado. Nas análises físicas, foi possível observar pequenas diferenças entre os resultados, mas nas análises químicas foi possível identificar maiores mudanças no grau de hidratação do cimento da argamassa aderida ao grão entre o ARCO de 25MPa, 30MPa, 35MPa e 40MPa.

Isso denota a possibilidade do uso desse tipo de classificação, porém, ainda são necessárias análises estatísticas e físico-químicas mais aprofundadas, e com maior número de amostras, para identificar diferenças e semelhanças de forma mais assertiva entre as classes propostas, evitando a possibilidade de falso negativo nas análises estatísticas devido à grande variabilidade de resultado de um pequeno grupo amostral. Além disso, análises de teor de argamassa aderida ao grão podem contribuir com o entendimento de diferenças e semelhanças entre as diferentes classes de ARCO propostas nesse estudo

5. Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), à CAPES e à Fundação Araucária, por disponibilizar a estrutura e o financiamento necessários para a realização da pesquisa; à Professora Doutora Patricia Krüger, pelo direcionamento na execução do trabalho; assim como ao comitê do Simpósio Paranaense de Patologia das Construções, pela oportunidade de disseminação do conhecimento no uso de materiais reciclados na construção.

Referências

- [1] United Nations Environment Programme; Global Alliance for Buildings and Construction (2024) *2023 Global status report for buildings and construction: beyond foundations - mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings*. Nairobi, Quênia.
- [2] Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (2023) *Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2023*. São Paulo, Brasil.

- [3] Guo, Z.; Tu, A.; Chen, C.; Lehman, D.E. (2018) Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates, *Journal of Cleaner Production*, 199:136-140.
- [4] Makul, N. (2021) A review on methods to improve the quality of recycled concrete aggregates, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 10(5):65-91.
- [5] Ning, W.; Lv, X. (2023) Effect of Recycled Fine Aggregate on Properties of Mortar, *Ceramics-Silikáty*, 67(4): 468-476.
- [6] NBR 15116 (2021) Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaios. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [7] Dobrovolski, E.R.G. (2025) *Avaliação do Ciclo de Vida de Agregado Reciclado Tratado com Álcool Polivinílico (PVA) na Mitigação da Pegada de Carbono*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil.
- [8] NBR 6118 (2023) Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [9] NBR 16915 (2021) Agregados - Amostragem. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [10] NBR 16917 (2021) Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [11] NBR 16972 (2021) Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [12] Chadha, V.; Rashid, S.; Singh, M.; Roy, A.B.D. (2024) Enhancing Sustainable Concrete: A Study on Mechanical Properties and Durability of Concrete with Treated Recycled Aggregates and Marble Dust. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*.
- [13] Zajac, M.; Bremeier, R.; Deja, J.; Król, M.; Ben Haha, M. (2025) Carbonation hardening of Portland cement with recycled supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 157.