REVISTA DE
ARQUITETURA IMED

Efeito da saturação do agregado graúdo reciclado na resistência mecânica e durabilidade do concreto

Effect of saturation of recycled coarse aggregate on the mechanical resistance and durability of concrete

Bárbara Jordani(1); Francisco Roger Carneiro Ribeiro(2); Valéria Costa de Oliveira(3); Rodrigo Cesar Pierozan(4)

1 Doutora em Engenharia Civil, Centro Universitário Avantis, Balneário Camboriú – SC.
E-mail: bbjordani@gmail.com | ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5857-9033
2 Doutorando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS.
E-mail: roger.ribeiro_@hotmail.com | ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8790-3023
3 Doutora em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia, Porto Velho – RO.
E-mail: valeria.oliveira@ifro.edu.br | ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7025-575X
4 Doutor em Geotecnia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo – PR.
E-mail: rodrigopierozan@utfpr.edu.br | ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2585-0840

Revista de Arquitetura IMED, Passo Fundo, vol. 13, n. 1, p. 70-91, janeiro-junho, 2024 - ISSN 2318-1109

DOI: https://doi.org/10.18256/2318-1109.2024.v13i1.5067

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Como citar este artigo / How to cite item: clique aqui!/click here!

Resumo

A incorporação de resíduos de concreto na produção de novos concretos revela-se como uma abordagem sustentável na construção civil. No entanto, é essencial o estudo das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto produzido com este resíduo, garantindo a segurança das edificações. Este trabalho investiga a resistência à compressão axial, a resistividade elétrica e a absorção de água por capilaridade em concretos convencionais, sob diferentes relações água/aglomerante (a/agl.), produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) secos e úmidos, curados em condições de baixa e alta umidade relativa. A resistência à compressão axial e a resistividade elétrica foram analisadas aos 28, 91 e 112 dias, enquanto a absorção de água por capilaridade foi avaliada apenas aos 28 dias. Em relação à condição de cura, a relação a/agl. de 0,31 apresentou os melhores resultados de resistência à compressão axial sob cura a 100%, variando de 10 a 50%, independente do tipo de agregado, mas verificou-se que efeito foi contrário no quesito de resistividade elétrica, em que a cura a 60% resultou em benefícios de até 12%, dependente do tipo de agregado. Além disso, observou-se que a inserção de AGRC nas condições de cura estudadas não indica risco à corrosão das armaduras. Portanto, este estudo contribui para a viabilidade do uso de agregados reciclados na produção de concretos sustentáveis, sem comprometer a durabilidade e a integridade estrutural das edificações.

Palavras-chave: Umidade relativa; Agregado graúdo reciclado de concreto; Resistência à compressão; Durabilidade; Concreto convencional.

Abstract

Incorporating concrete waste in producing new concretes has proven to be a sustainable approach in civil construction. However, it is essential to study the mechanical and durability properties of concrete produced with this waste to ensure the safety of buildings. This work investigates the axial compressive strength, electrical resistivity, and capillary water absorption in conventional concretes under different water/binder ratios (w/b), produced with dry and recycled coarse aggregates from concrete (RCAC), cured in low and high relative humidity conditions. The axial compressive strength and electrical resistivity were analyzed at 28, 91, and 112 days, while capillary water absorption was evaluated only at 28 days. Regarding the curing condition, the w/b ratio of 0.31 presented the best results for axial compressive strength under 100% curing, ranging from 10 to 50%, regardless of the type of aggregate, but it was found that the effect was the opposite in terms of electrical resistivity, in which curing at 60% resulted in benefits of up to 12%, depending on the type of aggregate. In addition, it was observed that the insertion of RCAC in the curing conditions studied does not indicate a risk of corrosion of the reinforcement. Therefore, this study contributes to the viability of using recycled aggregates in producing sustainable concrete without compromising buildings' durability and structural integrity.

Keywords: Relative humidity; Recycled concrete coarse aggregate; Compressive strength; Durability; Conventional concrete.

1 Introdução

A produção de concreto está associada a desafios ambientais significativos, especialmente devido ao uso de cimento, agregados finos e graúdos e água. A produção de cimento, por exemplo, requer uma enorme quantidade de energia e é uma das principais fontes de emissão de dióxido de carbono (CO_2) no mundo, contribuindo com cerca de 7% a 8% das emissões antropogênicas globais desse gás, ficando atrás apenas dos combustíveis fósseis como gás natural, petróleo e carvão mineral (ANDREW, 2022; PRAKASH *et al.*, 2022). Diante da urgência em lidar com as mudanças climáticas e promover a sustentabilidade na indústria da construção, esforços globais têm sido feitos para reduzir essas emissões e aprimorar a proteção ambiental e a gestão de recursos. Governos ao redor do mundo têm promovido políticas sustentáveis para mitigar os impactos ambientais e alcançar benefícios econômicos (PICCINALI *et al.*, 2022).

A destinação correta dos resíduos sólidos industriais tem se tornado uma preocupação ambiental crescente para as indústrias geradoras, uma vez que muitos desses resíduos são descartados em aterros e/ou lagoas, contaminando o solo, a água e o ar ISAIA *et al.*, 2017; (SANTOS; LEITE, 2018; LIMA *et al.*, 2020). Para minimizar essa situação, políticas sustentáveis têm sido implementadas, empregando tributação para desencorajar o descarte de resíduos em aterros e promovendo a recuperação e reintegração de resíduos sólidos, especialmente os de construção e demolição, no ciclo de produção (PICCINALI *et al.*, 2022). No Brasil, os resíduos de construção e demolição são compostos principalmente por materiais inertes, como agregados, cerâmicas, argamassas e concreto (WASKOW *et al.*, 2020).

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2018, as cidades brasileiras coletaram aproximadamente 45 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição, com uma taxa de geração de aproximadamente 213,50 kg de resíduo por habitante por ano, excluindo os resíduos gerados pelas construtoras (ABRELPE, 2019). Estudos sugerem que a taxa de geração real pode ser ainda maior, levando a uma estimativa anual de 106 milhões de toneladas no Brasil (JOHN; AGOPYAN, 2000). Embora esses materiais muitas vezes não agreguem valor comercial à atividade produtiva, podem ser propícios ao reuso.

As propriedades dos agregados reciclados de concreto podem variar significativamente, dependendo do método de aquisição, tamanho das partículas, quantidade de argamassa aderida e qualidade original do concreto (SIM *et al.*, 2021). Estudos exploraram diversos métodos e tratamentos para melhorar a qualidade desses agregados. Por exemplo, a remoção ou reforço da argamassa aderida pode produzir agregados reciclados de alta qualidade (OUYANG *et al.*, 2020); métodos como a impregnação de sílica ativa e a limpeza ultrassônica têm sido utilizados para aumentar a porosidade superficial do agregado reciclado e remover partículas soltas,

respectivamente, resultando em melhorias na resistência à compressão do concreto reciclado (KATZ, 2004), bem como tratamentos mecânicos, térmicos ou químicos para remover a argamassa aderida também demonstraram efeitos positivos na resistência de aderência e na resistência à compressão (PANDURANGAN *et al.*, 2016).

Apesar de ser viável tecnicamente produzir agregados reciclados de alta qualidade com propriedades comparáveis às dos agregados naturais, esses tratamentos podem ser onerosos, demorados e energeticamente intensivos. Agregados reciclados frequentemente exibem menor densidade e maior absorção de água em comparação com agregados naturais, devido à presença de argamassa aderida (WANG *et al.*, 2021). As diretrizes da RILEM (*The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*) recomendam evitar o uso de agregados graúdos reciclados com absorção de água superior a 7% na produção de concreto, enquanto normas europeias permitem a substituição de até 50% dos agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados sob determinadas condições.

Embora seja viável produzir agregados reciclados de alta qualidade com propriedades comparáveis às dos agregados naturais, alcançar tal qualidade pode requerer tratamentos onerosos, demorados e energeticamente intensivos, que incluem a remoção de contaminantes, classificação, lavagem, peneiramento e múltiplas etapas de britagem (QUATTRONE *et al.*, 2014). Chen *et al.* (2019) complementam que fração fina do agregado reciclado geralmente possui um maior teor de argamassa, o que a torna inadequada para a produção de concreto estrutural.

Estudos conduzidos por Limbachiya *et al.* (2000) e Corinaldesi (2011) não encontraram uma influência significativa na resistência à compressão do concreto reciclado ao substituir até 30% dos agregados naturais por agregados reciclados. As condições de umidade têm um impacto significativo na trabalhabilidade do concreto reciclado devido à maior absorção de água desses agregados. Contudo, os resultados dessas pesquisas têm sido inconsistentes e influenciados por diversas variáveis, necessitando de maiores investigações.

Poon *et al.* (2004) observaram que altas proporções de agregado reciclado, especialmente quando no estado saturado de superfície seca, resultaram em misturas de concreto menos coesas e propensas ao sangramento durante a produção, o que levou a uma redução na resistência à compressão. Além disso, foi notado que a condição ideal de umidade foi a secagem ao ar. Brand *et al.* (2015) relataram que as maiores resistências à compressão foram alcançadas usando um estado saturado de superfície seca de 80% e as propriedades de resistência foram maiores quando o agregado reciclado de concreto estava, pelo menos, parcialmente saturado. No entanto, outros estudos destacaram que a pré-saturação do agregado reciclado tem um impacto negativo na resistência e durabilidade do concreto (FERREIRA *et al.*, 2011; KEBAILI *et al.*, 2013; GARCÍA-GONZÁLEZ *et al.*, 2014; GUERZOU *et al.*, 2019). A duração da pré-imersão foi

identificada como um fator determinante na fluidez do concreto fresco reciclado. Zhang *et al.* (2022) concluíram que o agregado reciclado parcialmente saturado é benéfico para o desempenho do concreto reciclado. Dadas as incertezas tecnológicas e as questões econômicas existentes, tornam-se necessárias mais investigações para promover a utilização de concreto sustentável que incorpore os agregados reciclados de concreto a fim de maiores aceitações no mercado da construção civil.

Uma maior utilização de materiais cimentícios suplementares (SCMs) pode potencialmente contribuir para a redução das emissões globais de CO_2. Diante deste contexto, este artigo objetiva investigar o emprego de agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) nas propriedades mecânicas e de durabilidade em concretos convencionais, considerando diferentes condições de umidade relativa e diferentes relações água/aglomerante.

2 Materiais e métodos

2.1 Materiais

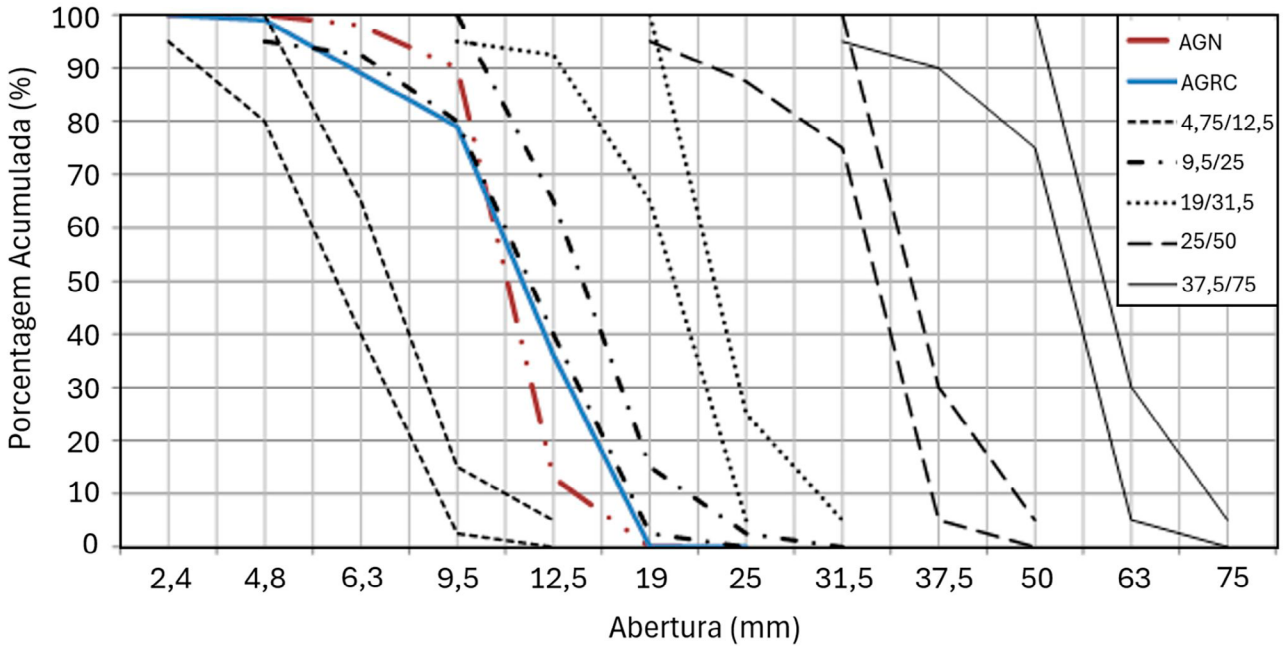
O cimento utilizado foi um cimento Portland CP-II-F-32, com massa específica é 3,10 g/cm³. A Tabela 1 apresenta a caracterização física, química e mecânica, conforme o fabricante. Para o alcance do abatimento adequado dos concretos, foi utilizado um aditivo superplastificante à base de policarboxilato de alto desempenho.

O agregado miúdo natural apresenta massa unitária de 1,55 g/cm³ e massa específica de 2,55 g/cm³. Para isolar o efeito da diferença da distribuição granulométrica dos agregados graúdos, ambos foram peneirados e as curvas foram compostas de maneira que apresentassem a mesma distribuição granulométrica (Figura 1). O agregado graúdo natural (AGN) é de origem basáltica, com massa unitária de 1,60 g/cm³ e massa específica de 2,90 g/cm³. O agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) foi proveniente de resíduo da produção de laje pré-fabricada tipo Roth, submetida a cura convencional, com fck de 35 MPa, triturado em um britador de mandíbulas. A massa unitária do AGRC é de 1,12 g/cm³ e a massa específica é de 2,21 g/cm³. Para ambos os agregados graúdos, adotou-se a fração passante na peneira de malha de abertura 19 mm e retida na peneira com abertura de 4,8 mm. Todos os resultados mencionados foram obtidos por meio das normativas brasileiras: NBR 16697 (2018), NBR 7211 (2022), NBR NM 52 (2021), NBR 17054 (2022), NBR 12655 (2022) e NBR 16917 (2021).

Tabela 1. Caracterização física, química e mecânica do cimento

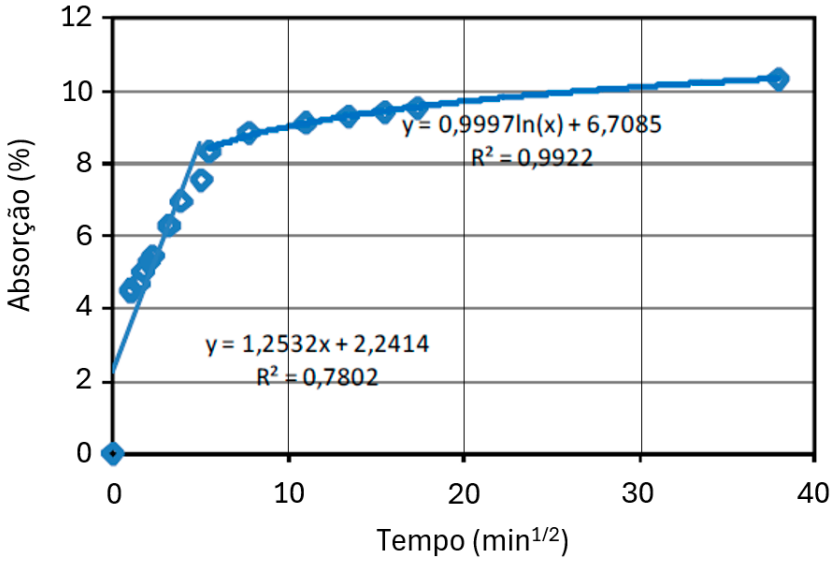
Especificações Químicas		**Especificações Físicas e Mecânicas**	
Al_2O_3 (%)	4,4	Início de Pega (min)	190
SiO_2 (%)	18,49	Fim de Pega (min)	240
Fe_2O_3 (%)	2,59	Água Const. Normal (%)	27,3
CaO (%)	59,93	Blaine (cm^2/g)	3,41
MgO (%)	4,76	#200 (%)	2,2
SO_3 (%)	2,78	#325 (%)	14,6
Perda ao Fogo (%)	4,92	fc 1 dia (MPa)	14,9
CaO Livre (%)	1,37	fc 3 dias (MPa)	28,6
Resíduo Insolúvel (%)	1,74	fc 7 dias (MPa)	33,8
Equivalente Alcalino (%)	0,62	fc 28 dias (MPa)	42,0
Expansão a Quente (mm)	0	Massa específica (g/cm^3)	3,103

Figura 1. Curvas granulométricas do agregado graúdo natural (AGN) e do agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC)



Como teste preliminar, realizou-se a avaliação da absorção de água do AGRC (Figura 2) através do método empregado por Werle (2010), em que foi possível observar que aos 10 minutos, ocorreu uma absorção de 6,29% e às 24 horas, uma absorção de 10,34%. O ponto de saturação deste conjunto de dados ocorreu aos 31,6 minutos com uma absorção de água de 8,96%.

Figura 2. Curva de absorção de água do agregado reciclado



Para realizar a determinação do teor de argamassa aderida ao agregado reciclado foi utilizado o método proposto por Ferreira (2007) e por Sanchez (2004). O teor médio de argamassa aderida ao concreto foi de 62,3 % e o teor de pasta foi de 12,6%.

2.2 Métodos

Para a produção dos concretos, adotou-se um teor de argamassa de 55% e consistência de classe S100 conforme NBR 8953 (ABNT, 2015). Entende-se por agregado graúdo reciclado de concreto seco (AGRCS), o agregado que permaneceu em estufa até constância de massa e por agregado graúdo reciclado de concreto úmido (AGRCU) aquele que foi pré-saturado. Independente da umidade relativa (UR), o agregado reciclado foi inserido ao final da mistura e a sua quantidade foi determinada por compensação de massa de acordo com a Equação 1, devido as diferentes massas específicas dos agregados, proporcionando constância do volume de pasta. A Tabela 2 apresenta o consumo de materiais e traços calculados para cada uma das formulações.

Tabela 2. Consumo de materiais para os traços investigados

Agregado	a/agl	C (kg/m³)	Agregado miúdo (m³)	AGN (m³)	AGRCS (m³)	AGRCU (m³)	Água	Massa Específica (kg/m³)	C real (kg/m³)	Aditivo (%)	Slump (mm)
AGN	0,31	581	666	1020	0	0	180	2540	603	0,27	150
	0,42	445	778	1001	0	0	187	2420	446	0,06	150
	0,53	360	848	988	0	0	191	2490	376	0,00	100
AGRCS	0,31	581	666	510	424	0	180	2470	608	0,16	130
	0,42	445	778	500	416	0	187	2430	465	0,07	155
	0,53	360	848	494	411	0	191	2430	380	0,00	110
AGRCU	0,31	581	666	510	0	424	180	2360	581	0,20	120
	0,42	445	778	500	0	416	187	2380	455	0,00	120
	0,53	360	848	494	0	411	191	2430	380	0,00	140

AGN = agregado graúdo natural; AGRCS = agregado graúdo reciclado de concreto seco; AGRCU = agregado graúdo reciclado de concreto úmido; a/agl = água/aglomerante; C = consumo de cimento teórico; M.E = massa específica do concreto no estado fresco; C real = consumo de cimento real.

A moldagem e a cura dos corpos de prova seguiram a NBR 5738 (ABNT, 2015). Foram produzidos um total de 18 corpos de prova para cada tipo de concreto. Após 24h da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e submetidos a duas condições de cura: submersa em tanques com água e cal, e em sala climatizada com umidade controlada de 60 ± 2 % sob temperatura ambiente de 23 ± 2 ºC.

A análise da resistência à compressão axial foi realizada de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018), com corpos-de-prova cilíndricos de dimensões (10x20) cm. Para cada traço de concreto foram ensaiados seis corpos de prova nas idades de 28, 91 e 112 dias, sendo metade curados em câmara úmida e a outra metade sob cura em sala climatizada. O ensaio foi realizado em prensa EMIC - INSTRON, modelo DL-200, classe I, com capacidade de carga de 2000 kgf, com erro menor que 0,5% e faixa de velocidade de carregamento de 0,008 mm/s.

O ensaio de resistividade elétrica (RE) foi executado com o equipamento da empresa Proceq, conhecido por RESIPOD, com espaçamento de 50 mm entre os eletrodos. O equipamento utiliza o método dos quatros pontos para efetuar a medida de resistividade elétrica do concreto. O procedimento adotado foi baseado no manual do equipamento e indica o risco de corrosão de uma estrutura de concreto armado em função dos valores obtidos. Este procedimento inicial poderá ser repetido quando as medidas de resistividade não estabilizarem no equipamento. Com a finalidade de assegurar um padrão de medidas, realizou-se as análises nos mesmos testemunhos do ensaio de resistência à compressão axial (duas medidas para cada corpo de prova) nas idades de 28, 91 e 112 dias.

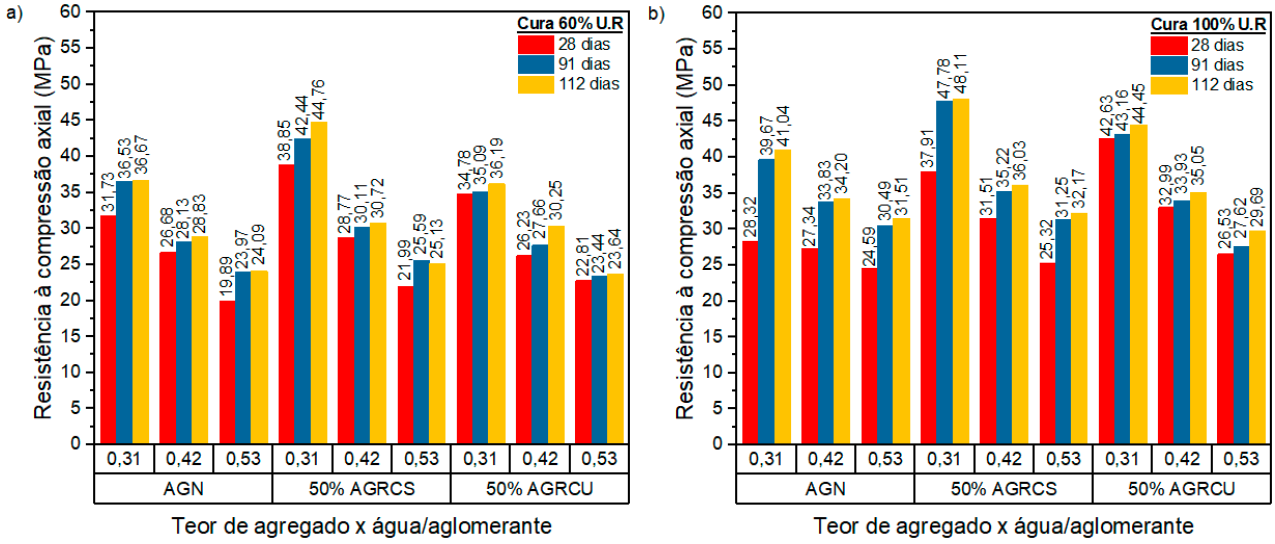
Para o teste de absorção de água por capilaridade, o método de ensaio foi baseado na metodologia proposta por Troian (2010) e Werle (2010). Os corpos de prova foram confeccionados com dimensões de (6x6x18) cm, cortados em três fatias da região central do corpo de prova. As amostras foram mantidas em estufa a 60 °C até a estabilização de massa e após, permaneceram em um dessecador até atingirem a temperatura ambiente em sala com temperatura controlada (22 ± 2 °C). Retiradas do dessecador, as laterais das amostras foram seladas com fita adesiva para impermeabilização das faces. Um balão de látex foi colocado na superfície superior, para que não houvesse influência da umidade externa na face superior da amostra. A superfície inferior permaneceu em contato com uma lâmina de água de profundidade de 3 mm. A absorção de água por capilaridade foi monitorada através da pesagem das amostras aos 28 dias. Para o registro da massa, as amostras foram retiradas da água e secas superficialmente com pano úmido para remover o excesso de água, de modo que a superfície permanecesse úmida.

3 Resultados e discussões

3.1 Resistência à Compressão Axial

Essa propriedade mecânica é uma das mais importantes a serem medidas no concreto endurecido. Níveis de resistência satisfatórios de acordo com as finalidades dos concretos refletem a qualidade dos materiais utilizados (LIMA *et al.,* 2020). A incorporação dos agregados graúdos, independente da umidade relativa e da relação a/agl., demonstrou um aumento na resistência à compressão em todas as idades investigadas, conforme Figura 3. Isto indica que o agregado reciclado pode contribuir para a resistência global do concreto, mesmo sendo um resíduo sólido.

Figura 3. Resistência à compressão axial dos concretos: (a) 60% UR; (b) 100% UR



Em contrapartida, em cada idade de cura, percebe-se uma diminuição da resistência dos concretos com o aumento da relação a/agl., independente do tipo de agregado. Ressalta-se que sob teores de 50% de AGRCU, as resistências em idades avançadas (112 dias) permaneceram ligeiramente constantes sob uma perspectiva de mesma relação a/agl., independente da UR empregada. Com relação ao tipo de cura, os concretos apresentaram resistências mecânicas superiores sob cura submersa quando comparados com a cura de 60% UR, independente do tipo de agregado. Leite (2001) e Ryu (2002) relatam que a resistência é impactada devido a superfície específica de agregados reciclados, qualidade da zona de transição na matriz e/ou utilização de agregados secos e sua maior porosidade e absorção de água.

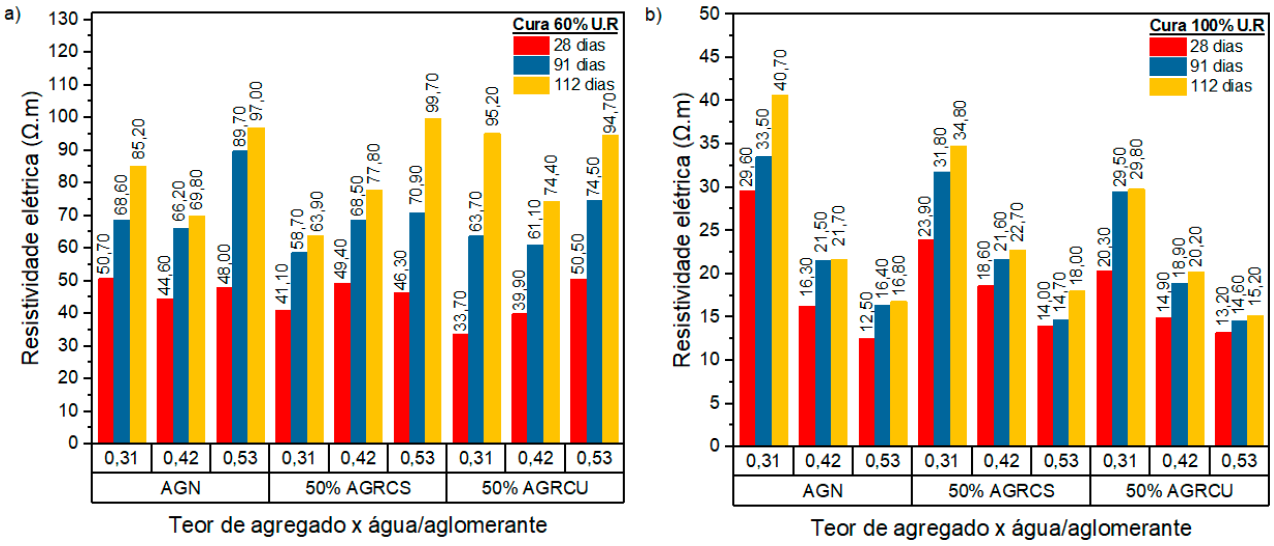
Os maiores valores de resistência do concreto com AGRCS com uma relação a/agl. de 0,31 podem estar relacionados à melhoria na zona de transição, graças à penetração dos produtos hidratados do cimento nos agregados porosos, atuando como um entrelaçamento mecânico. Essa observação é coerente com os resultados apresentados por Vargas *et al.* (2017). Isso ocorre devido à presença de argamassa de cimento aderida ao agregado reciclado de superfície rugosa, promovendo uma melhora na interface entre a pasta e o agregado (KOU; POON, 2013; DUAN; POON, 2014).

Bui *et al.* (2017) implementaram novas metodologias na mistura de concreto e identificaram um limite aceitável de substituição de até 50%, sem comprometer as propriedades mecânicas do concreto. Nessas novas metodologias, apenas algumas dimensões do agregado graúdo (7,93 mm, 6,73 mm e 5,60 mm) foram substituídas. No entanto, nesta investigação, utilizou-se o método convencional, que se baseia unicamente na porcentagem de substituição dos agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados.

3.2 Resistividade Elétrica

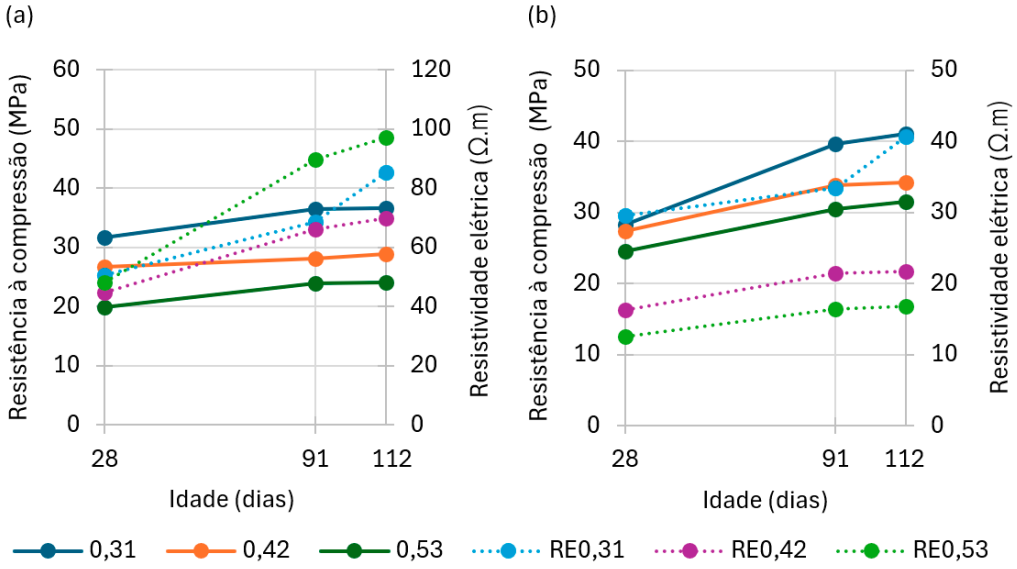
Os resultados da resistividade elétrica dos concretos estão demonstrados na Figura 4.

Figura 4. Resistividade elétrica dos concretos: (a) 60% UR; (b) 100% UR



A partir dos resultados da Figura 4 verificou-se que o incremento de água no concreto e sob idades mais avançadas, quando a umidade relativa foi de 60%, os valores de resistividade elétrica aumentaram, o que corresponde à capacidade do concreto em resistir à transferência de íons (AZARSA; GUPTA, 2017). Os autores complementam que os processos de degradação em estruturas de concreto armado que afetam a durabilidade são parcialmente controlados pelo transporte de íons agressivos através da microestrutura do concreto. A Figura 5 demonstra os benefícios que a cura a 100% de umidade relativa promove aos concretos produzidos com AGN quanto ao aumento da resistência à compressão. Neste sentido, Li *et al.* (2019) indicam que a formação de produtos de hidratação e as características dos poros da pasta de cimento são dependentes das condições de cura. A formação de etringita é favorável à cura com baixa temperatura e alta UR. Os valores de resistividade mostrados nos gráficos correspondem à resistividade média dos cilindros submetidos a cada um dos regimes de cura.

Figura 5. Resistência à compressão *versus* resistividade elétrica do concreto com AGN: (a) 60% UR; (b) 100% UR



Observa-se aumentos da resistividade elétrica dos 28 dias até 91 dias, e uma estabilidade nos valores de 91 dias até 112 dias, em que esse mesmo comportamento foi verificado para a resistência à compressão. Presuel-Moreno *et al.* (2013) relatam que 28 dias representa um período de tempo muito curto para estimar o fator de envelhecimento e os valores de resistividade elétrica. No caso dos concretos AGN curados a 60% UR, a resistência à compressão e a resistividade elétrica aumentaram aos 91 dias para todas as relações de água/aglomerante, contudo mantiveram estabilidade aos 112 dias. O cenário de cura a 100% UR demonstrou incrementos de resistência à compressão de 5 MPa para a relação a/agl. de 0,53 aos 28 dias. Ainda, verifica-se incrementos resistência à compressão de 10 MPa aos 91 dias, estabilizando aos 112 dias.

Conforme Helene (1993), o concreto, quando saturado em água, comporta-se como um semicondutor, com valores de resistividade elétrica da ordem de 100 Ω.m. A resistividade elétrica reduziu cerca de 275%, de 100 Ω.m na condição de cura de 60% de UR para aproximadamente 40 Ω.m na cura de 100% de U. R, no caso da relação a/agl. de 0,31 aos 112 dias. No caso da relação a/agl. de 0,42, a redução de resistividade elétrica foi de aproximadamente 350%, de 70 Ω.m para 20 Ω.m. Por fim, para a relação a/agl. de 0,53, a redução foi de 667%, correspondendo a redução de 100 Ω.m para 15 Ω.m. Estes resultados estão coerente com os de estudo de Presuel-Moreno *et al.* (2013).

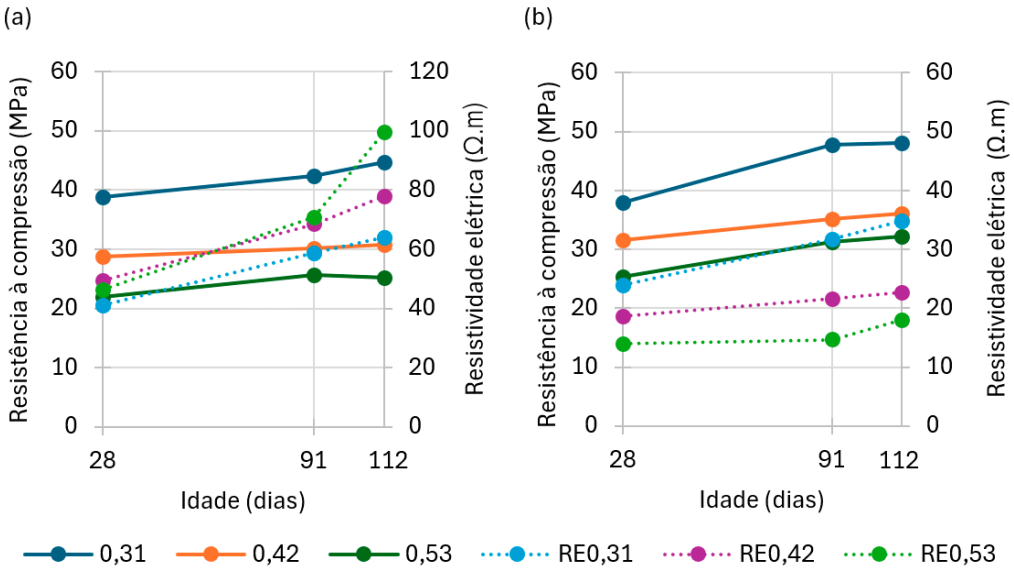
Chao-Lung *et al.* (2011) observaram um aumento na resistividade elétrica a partir da redução do volume dos poros capilares. Os estudos de Silva (2016) concluíram que as maiores resistividades elétricas dos concretos com alta relação a/agl. (0,81) com baixas umidades relativas do meio ambiente são devidas as maiores velocidades de saída da água, pois os mesmos possuem uma maior porosidade, sendo esta mais aberta e interligada entre si. Desta forma, os autores complementam que o processo de cura

ainda garante benefício à microestrutura do concreto e verificaram que concretos com menor relação a/agl. (0,35) tendem apresentar maiores valores de resistividade elétrica superficial quando submetidos à cura submersa, uma vez que é possível melhorar a hidratação da pasta de cimento da mistura, reduzindo a evaporação da água empregada no amassamento dos concretos e promovendo uma menor porosidade do material.

Os concretos com menor a/agl. (0,35) mostraram o efeito da melhoria da microestrutura sobre a resistividade elétrica. Silva (2016) explica que à medida que se aproxima dos 91 dias, o concreto com maior a/agl. (0,81) sem cura, atinge os maiores valores de resistividade elétrica devido a sua alta porosidade e influência da extrema secagem, pois a umidade externa é baixa no ambiente laboratorial.

Conforme Helene (1993), a resistividade elétrica quantifica, mesmo que superficialmente, o grau de saturação dos poros, uma vez que depende do grau de hidratação do cimento e eleva-se com o aumento deste. A Figura 6 ilustra o comportamento dos resultados obtidos de Resistência à compressão *versus* Resistividade elétrica do concreto considerando as seguintes condições de cura para as dosagens de concreto produzidas com 5% AGRCS.

Figura 6. Resistência à compressão *versus* resistividade elétrica do concreto com 50% AGRCS: (a) 60% UR; (b) 100% UR

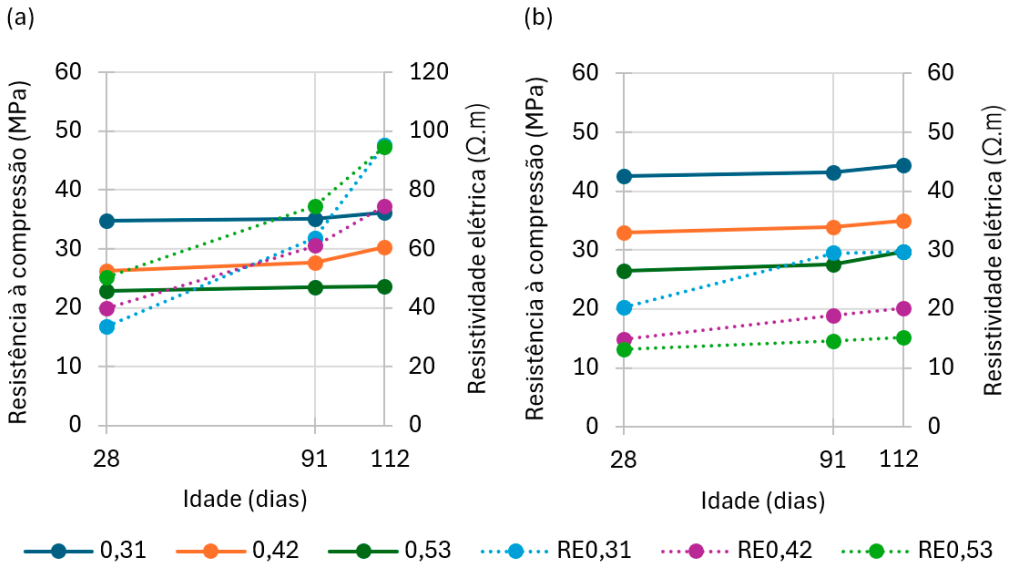


Os resultados de resistência à compressão dos concretos produzidos com AGRCS, para a condição de cura a 60% UR, mostraram-se superiores aos concretos fabricados com AGN. Para a relação a/agl. de 0,31, o incremento da propriedade mecânica foi de aproximadamente 10 MPa; para 0,42 foi 5 MPa e 0,53 correspondeu a 2 MPa. Na condição de cura a 100% UR, as resistências mecânicas mantiveram semelhanças de valores quando comparados aos concretos produzidos com AGN. A cura na condição de 100% UR acarretou a redução dos valores da resistividade elétrica superiores a 50%. Desta forma, conclui-se que o emprego do agregado reciclado graúdo seco não alterou

significativamente as propriedades mecânicas e de resistividade elétrica, concordando com Ismail *et al.,* (2017) ao relatarem que a durabilidade do concreto produzido com agregados reciclados parece se beneficiar de condições prolongadas de cura úmida.

Neste sentido, Sasanipour e Aslani (2020) indicam que a substituição de até 25% de agregados reciclados graúdos não apresenta efeito significativo nas propriedades de durabilidade do concreto autoadensável, incluindo resistividade elétrica e resistência a íons cloreto. Resultados similares foram obtidos por Singh e Singh (2019), que obtiveram no máximo 5% de perda das resistências mecânicas para substituição de 25% de agregados naturais por agregados reciclados em concretos autoadensáveis. Os aumentos observados na resistência à compressão dos concretos produzidos com agregados reciclados são devidos à textura áspera e à capacidade de absorção da argamassa aderida em agregados reciclados que proporcionam melhor ligação e intertravamento entre a pasta de cimento e os próprios agregados reciclados em comparação com os concretos produzidos com agregados naturais (ETXEBERRIA *et al*., 2007). O acúmulo de cimento na superfície dos agregados produzem uma relação a/agl. muito baixa e efetiva zona de transição interfacial. Etxeberria *et al*., (2007) concluem que o concreto de média resistência à compressão axial (30–45 MPa) produzido com 25% de agregados graúdos reciclados atinge as mesmas propriedades mecânicas que o concreto convencional empregando a mesma quantidade de cimento e a mesma relação a/agl. efetiva. A Figura 7 demonstra os resultados de resistência à compressão e resistividade elétrica dos concretos produzidos com os agregados graúdos reciclados de concreto úmidos.

Figura 7. Resistência à compressão *versus* resistividade elétrica do concreto com 50% AGRCU: (a) 60% UR; (b) 100% UR



A substituição de agregados reciclados graúdos na condição úmida proporcionou perdas de resistências mecânicas sob cura de 60% UR, provavelmente por acrescentar água na mistura, além da relação a/agl. de dosagem dos concretos. Contudo, na condição de 100% UR, as resistências mecânicas mantiveram-se similares aos resultados da condição de agregados secos e com incrementos de desempenhos superiores aos agregados naturais.

A capacidade de absorção de água é uma das propriedades mais significativas que distinguem os agregados reciclados dos agregados naturais e pode ter influência nas propriedades do concreto fresco e endurecido. Conforme Etxeberria *et al*., (2007), um limite de substituição de 30% é o suficiente para manter o requisito padrão de 5% de capacidade de absorção de agregados para concreto estrutural.

No estudo de El-Hawary e Al-Sulily (2020), os agregados reciclados foram utilizados como meio para suplementos de água para fornecer cura interna, devido à sua alta absorção de água em comparação com agregados naturais. Grabiec *et al.* (2020) complementam que o uso de agregado saturado em água reduz significativamente a absorvência de água e sorção do concreto em relação aos compósitos, onde agregado superficialmente seco foi usado. Este último tipo de agregado contribui para uma maior porosidade da zona de contato da pasta agregado-cimento. A análise estatística mostrou que a influência do emprego de agregados reciclados na resistência à compressão foi menos significativa do que a forma de cura para as duas condições de agregados secos e úmidos.

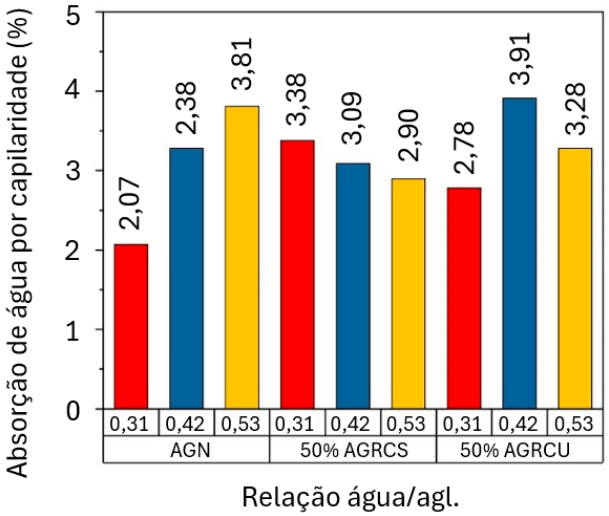
Quanto à resistividade elétrica, as dosagens que empregaram o agregado reciclado úmido sob 100% UR apresentaram os menores resultados quando comparados às misturas com os agregados naturais e agregados reciclados secos. De forma que quanto maior a umidade interna, menor é a resistividade elétrica superficial. Estes resultados concordam com o estudo de Silva (2016), uma vez que concretos nessa condição de UR não perde água, mas isso não significa que esses concretos tenham uma pior qualidade e sim, que existe muita água nos poros destes concretos, sendo responsável pela condutividade elétrica dos corpos-de-prova e por garantir os baixos valores de resistividade elétrica superficial aferidos.

Pickel (2014) explica que a presença de água nos grãos dos agregados se apresenta como uma fonte adicional de água durante os processos de hidratação. Essa água permite uma reação de hidratação mais completa, menor retração, um sistema de poros de concreto menos permeável e menos suscetibilidade aos efeitos negativos da cura inadequada.

3.3 Absorção de Água por Capilaridade

Na Figura 8 estão apresentados os resultados de absorção de água por capilaridade dos concretos.

Figura 8. Absorção de água por capilaridade dos concretos



A análise da absorção de água por capilaridade dos concretos, conforme apresentada na Figura 8, revela que a relação água/aglomerante tem um impacto significativo na absorção de água por capilaridade. Observa-se um aumento na absorção de água à medida que a relação a/agl aumenta, com a menor absorção registrada para o concreto com AGN sob relação de 0,31 e a maior absorção para o concreto com AGN sob relação 0,53.

Para o concreto com 50% de agregado graúdo reciclado de concreto seco (AGRCS) observa-se que para esse tipo de agregado houve uma redução na absorção de água com o aumento da relação a/agl., ao contrário do que foi observado no caso do concreto com AGN. Por outro lado, o concreto com 50% de agregado graúdo reciclado de concreto úmido (AGRCU) exibiu uma maior absorção na relação a/agl. de 0,42, seguida por uma ligeira redução na relação de 0,53, o que pode indicar uma variação específica de comportamento pelo agregado graúdo reciclado de concreto úmido.

Os concretos com agregados reciclados, sejam secos ou úmidos, tendem a apresentar uma absorção de água por capilaridade maior do que os concretos com agregados naturais, especialmente em menores relações água/aglomerante (KOU; PON, 2013). Porém, isso não foi observado, sendo até contraditório, uma vez que a qualidade dos agregados graúdos reciclados influenciam nessa propriedade.

O aumento da absorção de água ocorreu com a inclusão dos agregados reciclados, variando apenas a relação a/agl. condiz com o trabalho de Kisku *et al.* (2017), devido à presença de argamassa aderida e porosidade. Caso a incorporação de grandes volumes de agregados reciclados aumente consideravelmente a absorção de água, esse efeito pode ser mitigado ou minimizado com o uso de materiais cimentícios suplementares, principalmente pozolânicos (KURAD *et al.*, 2017).

4 Considerações Finais

O presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da umidade relativa em agregados graúdos reciclados de concreto na resistência mecânica e durabilidade de concretos convencionais. A partir dos resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser destacadas:

- A incorporação de agregados reciclados (secos e úmidos), independentemente da umidade relativa e da relação água/aglomerante, resultou em um aumento na resistência à compressão em todas as idades investigadas. No entanto, a resistência em idades avançadas (após 28 dias) permaneceu relativamente constante, particularmente sob teores de 50% de AGRCU.
- A cura sob 100% de umidade relativa mostrou-se benéfica para o aumento da resistência à compressão dos concretos com AGN. Incrementos significativos na resistência foram observados aos 28 e 91 dias, estabilizando aos 112 dias.
- Concretos produzidos com AGRCS apresentaram resistências à compressão superiores em relação aos concretos com AGN, especialmente sob condições de cura a 60% de umidade relativa.
- O incremento de água no concreto e as idades mais avançadas, especialmente sob cura a 60% de umidade relativa, aumentaram os valores de resistividade elétrica. A cura a 100% de umidade relativa reduziu a resistividade elétrica significativamente.
- A resistividade elétrica mostrou um comportamento inversamente proporcional à resistência à compressão, com reduções substanciais nos valores de resistividade elétrica sob cura a 100% de umidade relativa para todas as relações água/aglomerante.
- A absorção de água por capilaridade aumentou ou se equiparou com o aumento da relação a/agl, independentemente do tipo de agregado utilizado. Os concretos com AGN apresentaram menor absorção de água em comparação com os concretos com agregados reciclados em menores relações água/aglomerante.

Em síntese, a pesquisa demonstra que o emprego de agregados graúdos reciclados de concreto, sob diferentes condições de umidade relativa, é uma alternativa técnica e ambientalmente viável que pode contribuir para a sustentabilidade na construção civil sem comprometer as propriedades essenciais do concreto. Futuros estudos devem explorar outras variáveis, como diferentes tipos de cimento e a incorporação de adições minerais.

Referências

ANDREW, R. A. Global CO_2 emissions from cement production. *Earth system Science data Discussions*, p. 1-52, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 12655:2022*. Concreto - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 16697:2018*. Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 16917:2021*. Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 17054:2022*. Agregados – Composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 5738:2015*. Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 5739: 2018*. Concreto – Ensaio de compressão com corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 7211:2022*. Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 8953:2015*. Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR NM 52:2021*. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2021.

AZARSA, P.; GUPTA, R. Electrical resistivity of concrete for durability evaluation: a review. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2017, n. 1, p. 8453095, 2017.

BRAND, A.S.; ROESLER, J.R.; SALAS, A. Initial Moisture and Mixing Effects on Higher Quality Recycled Coarse Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, 79, 83–89, 2015

BUI, N.K., SATOMI, T., TAKAHASHI, H. Improvement of mechanical properties of recycled aggregate concrete based on a new combination method between recycled aggregate and natural aggregate", https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.084. *Construction and Building Materials*, v.148, pp. 376-385, Sep. 2017.

CHAO-LUNG, H.; LE ANH-TUAN, B.; CHUN-TSUN, C. Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 9, p. 3768-3772, 2011.

CHEN, X.; LI, Y.; KANG, X.; FAN, Y. Study on Recycled Concrete Powders as Mineral Admixture in Recycled Concrete Study on Recycled Concrete Powders as Mineral Admixture in

Recycled Concrete. *IO7P Conf. Ser. Earth Environ. Sci*., 330, 022113, 2019.

CORINALDESI, V. Structural Concrete Prepared with Coarse Recycled Concrete Aggregate: From Investigation to Design. *Advances in Civil Engineering*, 283984, 2011.

DUAN, Z. H.; POON, C. S. Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Materials and Design*, v. 58, pp. 19-29, 2014.

EL-HAWARY, M.; AL-SULILY, A. Internal curing of recycled aggregates concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 275, p. 122911, 2020.

ETXEBERRIA, M. VÁSQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 5, p. 735-742, 2007.

FERREIRA, L. M. M. *Betões estruturais com incorporação de agregados grossos reciclados de betão. Influência da pré-saturação*. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

FERREIRA, L.; DE BRITO, J.; BARRA, M. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*, 63, 617–627, 2011.

GARCÍA-GONZÁLEZ, J.; RODRÍGUEZ-ROBLES, D.; JUAN-VALDÉS, A.; DEL POZO, J.M.M.; GUERRA-ROMERO, M.I. Pre-saturation technique of the recycled aggregates: solution to the water absorption drawback in the recycled concrete manufacture. *Materials*, 7, 6224–6236, 2014.

GRABIEC, ANNA M.; ZAWAL, DANIEL; RASAQ, WAHEED ADEWALE. The effect of curing conditions on selected properties of recycled aggregate concrete. *Applied Sciences*, v. 10, n. 13, p. 4441, 2020.

GUERZOU, T.; MEBROUKI, A.; CASTRO-GOMES, J**.** Influence of Pre-Saturation of Recycled Aggregates on Concrete Workability and Strength. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 42, 76–85, 2019.

HELENE, P. R. *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.* Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo, 1993.

ISAIA, G. C.; ZERBINO, R. L.; GASTALDINI, A. L. G.; SENSALE, G. R. Viabilidade do emprego de cinza de casca dearroz natural em concreto estrutural (parteII): durabilidade. *Ambiente Construído*, v. 17, n. 2, p. 233–252, 2017.

ISMAIL, S.; KWAN, W. H.; RAMLI, M. Mechanical strength and durability properties of concrete containing treated recycled concrete aggregates under different curing conditions. *Construction and Building Materials*, v. 155, p. 296-306, 2017.

JOHN, V. M. *Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*, Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo, 2000.

KATZ, A. Treatments for the improvement of recycled aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16, 597–603, 2004.

KEBAILI, O.; LAYACHI, B.; NOURREDINE, A. Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. *Journal of Cleaner Production*, 54, 282–288, 2013.

KISKU, N.; JOSHI, H.; ANSARI, M.; PANDA, S.K.; NAYAK, S.; DUTTA, S.C. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, v. 131, p. 721-740, 2017.

KOU, S.; POON, C. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, v. 37, p. 12-19, 2013.

KURAD, R.; SILVESTRE, J.D.; DE BRITO, J.; AHMED, H. Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 166, p. 485-502, 2017.

LEITE, M. B. *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduo de construção e demolição*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LI, L. WANG, R.; ZHANG, S. Effect of curing temperature and relative humidity on the hydrates and porosity of calcium sulfoaluminate cement. *Construction and Building Materials*, v. 213, p. 627-636, 2019.

LIMA, C. J. F. de; RIBEIRO, F. R. C.; ISAIA, G. C.; MANCIO, M. Concretes with binary mixtures of artificial pozzolans and concrete demolition waste. *Ambiente Construído*, v. 20, n. 4, p. 177-188, 2020.

LIMBACHIYA, M.C.; LEELAWAT, T.; DHIR, R.K. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*, 33, 574–580, 2020.

OUYANG, K.; SHI, C.; CHU, H.; GUO, H.; SONG, B.; DING, Y.; GUAN, X.; ZHU, J.; ZHANG, H.; WANG, Y.; ZHENG, J. An overview on the efficiency of different pretreatment techniques for recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121264, 2020.

PANDURANGAN, K.; DAYANITHY, A.; OM PRAKASH, S. Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 120, 212–221, 2016.

PICCINALI, A.; DIOTTI, A.; PLIZZARI, G.; SORLINI, S. Impact of recycled aggregate on the mechanical and environmental properties of concrete: A Review. *Materials*, 15, 1818, 2022.

PICKEL, D. *Recycled concrete aggregate: Influence of aggregate pre-saturation and curing conditions on the hardened properties of concrete*. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas), University of Waterloo, Canada, 2014.

POON, C.S.; SHUI, Z.H.; LAM, L.; FOK, H.; KOU, S.C. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 31–36, 2004.

PRAKASH, R.; RAMAN, S.N.; SUBRAMANIAN, C.; DIVYAH, N. Eco-Friendly Fiber-Reinforced Concretes. In Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management: Recycled and Artificial Aggregate, Innovative Eco-Friendly Binders, and Life Cycle Assessment; Woodhead Publishing: Thorston, UK, pp. 109–145, 2022.

PRESUEL-MORENO, F.; WU, Y.-Y.; LIU, Y. Effect of curing regime on concrete resistivity and aging factor over time. *Construction and Building Materials*, v. 48, p. 874-882, 2013.

QUATTRONE, M.; ANGULO, S.C.; JOHN, V.M. Energy and CO2 from high performance recycled aggregate production. *Resources, Conservation and Recycling*, 90, 21–33, 2014.

RYU, J. S. An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*, v. 54, n. 1, p.7–12, 2002.

SANCHEZ, M. *Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural*. Tese (Doutorado em Construção) – Universidade Politécnica de Madri, Madri, 2004.

SANTOS, A. A. M. dos; LEITE, M. B. Avaliação de concretos reciclados com agregado graúdo de concreto dosados pelo método da ABCP modificado. *Ambiente Construído*, v. 18, n. 4, p. 341–359, 2018.

SASANIPOUR, Hossein; ASLANI, Farhad. Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 236, p. 117540, 2020.

SILVA, L. M. A. *Resistividade elétrica superficial do concreto: influência da cura*. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

SILVA, R.V.; DE BRITO, J.; DHIR, R.K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201–217, 2014.

SIM, G.; QUATTRONE, M.; MONTEIRO, W.; CAZACLIU, B.G. Current applications of recycled aggregates from construction and demolition: A Review. *Materials*, 14, 1700, 2021.

SINGH, N.; SINGH, S. P. Electrical resistivity of self consolidating concretes prepared with reused concrete aggregates and blended cements. *Journal of Building Engineering*, v. 25, p. 100780, 2019.

TROIAN, A. *Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto*. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

VARGAS, P.; RESTREPO-BAENA, O.; TOBÓN, J. I. Microstructural analysis of interfacial transition zone (ITZ) and its impact on the compressive strength of lightweight concretes. *Construction and Building Materials*, v. 137, n. 15, pp. 381-389, 2017.

WANG, B.; YAN, L.; FU, Q.; KASAL, B. A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 171, 105565, 2021.

WASKOW, R. P.; SANTOS, V. L. G.; AMBRÓS, W. M.; SAMPAIO, C. H.; PASSUELLO, A.;

TUBINO, R. M. C. Optimization and dust emissions analysis of the air jigging technology applied to the recycling of construction and demolition waste. *Journal of Environmental Management*, v. 266, 2020.

WERLE, A.P. *Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto com ênfase na carbonatação.* 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

ZHANG, H.; XU, X.; LIU, W.; ZHAO, B.; WANG, Q. Influence of the moisture states of aggregate recycled from waste concrete on the performance of the prepared recycled aggregate concrete (RAC)—A Review. *Construction and Building Materials*, 326, 126891, 2022.