

ANÁLISE DA CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS

Lucimar Pereira Cezar¹
Fabio Henrique Casarini Geronimo²
Tairine Roquete Alves Carneiro³
Rosane de Paula Castro⁵
Mayara Paula Silva Franco Castilho⁵
Lara Morinaga Matida⁶

RESUMO

Devido ao seu grande volume de uso, o concreto tem se tornado um gerador crescente de resíduos e desperdícios na construção civil. O concreto é obtido pela mistura de materiais primários como cimento, agregados e água e seu consumo anual per capita é superado apenas pelo consumo de água. Nesse cenário, surge a necessidade de minimizar os impactos ambientais, explorando a possibilidade de reutilizar esses resíduos. O objetivo desta pesquisa é analisar a influência da carbonatação em concretos produzidos com diferentes porcentagens de agregados reciclados de concreto (ARC). Para este estudo foram produzidos corpos de prova (CP's) de concreto moldados com diferentes níveis de substituição de agregado miúdo reciclado e diferentes processos de cura. Os CP's de (ARC) apresentaram uma perda significativa de resistência durante os ensaios de compressão, especialmente quando comparadas àquelas que passaram por cura externa. Apesar do ARC ter apresentado uma maior suscetibilidade à carbonatação, as diferenças não foram tão drásticas comparadas ao concreto de referência indicando que o uso de agregados reciclados pode ser viável. Os resultados dos ensaios de 28 dias demonstraram que, em relação à amostra com o traço de referência, houve uma redução de 26% na sua resistência, limitando seu uso em aplicações estruturais. No entanto, essa redução não impede a utilização para outros fins como pavimentação e contra piso. Já os resultados dos ensaios com a cura no estacionamento com traço de referência, houve um aumento de no mínimo 21% na resistência do concreto, possibilitando sua utilização para fins estruturais. **Palavras-chave:** Construção civil, reciclagem de materiais, sustentabilidade

¹Graduado em Engenharia Civil. Centro Universitário Araguaia (UniAraguaia) – lucimar.pereira@estudante.uniaraguaia.edu.br

² Docente do curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Araguaia (UniAraguaia). Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) – fabio.geronimo@uniaraguaia.edu.br

³ Docente e coordenadora do curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Araguaia (UniAraguaia). Mestra em geotecnia, estruturas e construção civil pela Universidade Federal de Goiás (UFG) – tairine.carneiro@uniaraguaia.edu.br

Docente do Centro Universitário Araguaia (Uniaraguaia) - Doutora em Física pela Universidade Federal de Goiás (UFG) – rosanecastro@uniaraguaia.edu.br

⁵ Docente do Centro Universitário Araguaia (Uniaraguaia) – Especialista em Docência do Ensino Superior pela Faculdade Brasileira de Educação e Cultura - FABEC e Mestra em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Goiás (UFG) – mayara.castilho@uniaraguaia.edu.br

⁶ Docente do Centro Universitário Araguaia (Uniaraguaia). Mestra em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil pela Universidade Federal de Goiás (UFG) – lara.morinaga@uniaraguaia.edu.br

ANALYSIS OF CARBONATION IN CONCRETE WITH REPLACEMENT OF RECYCLED AGGREGATES

ABSTRACT

Due to its high volume, concrete has become an increasing generator of waste and debris in civil construction. Concrete is obtained by mixing primary materials such as cement, aggregates, and water, which its per capita consumption surpassed only by water. Therefore, the need arises to minimize environmental impacts by exploring the possibility of reusing this waste. This research aims to analyze the influence of carbonation on concrete produced with different percentages of recycled aggregates. Thereby, concrete test specimens were produced using varying levels of recycled fine aggregate substitution and cure process. The ARC specimens showed significant strength loss during compression tests, especially compared to those subjected to external curing. While the recycled aggregate exhibited greater susceptibility to carbonation, the differences were not as drastic comparing the reference specimen, indicating that the use of recycled aggregates may be feasible. The results from the 28-day tests showed that, in relation to the reference specimen, there was a 26% reduction in concrete strength, making their use restricted by structural applications. However, this reduction does not prevent their use for other purposes such as paving and subfloors. On the other hand, the test results for the specimens cured in a parking lot using the reference mix showed a minimum 21% increase in concrete strength, enable its use for structural purposes.

Keywords: Civil Construction, Materials recycling, Sustainability

INTRODUÇÃO

Na construção civil, o concreto é um dos principais materiais utilizados, sendo essencial em praticamente todos os processos construtivos. No entanto, com o passar do tempo, o concreto pode envelhecer ou apresentar manifestações patológicas, como a carbonatação. Isso torna o controle de qualidade do concreto armado durante a execução em canteiros de obras um fator primordial para a durabilidade e segurança das edificações (LIMA, 2014).

Assim, a segurança de uma obra depende de vários fatores, como o atendimento aos parâmetros de qualidade e a escolha adequada do tipo de concreto a ser utilizado. Essa escolha é especialmente importante no contexto de uma construção sustentável, em que o uso de agregados reciclados ganha destaque (SILVA, 2013, CABRAL, 2007).

Essa crescente preocupação com a sustentabilidade e a preservação do meio ambiente tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de materiais de construção menos agressivos. Dentre esses materiais, o concreto reciclado tem ganhado destaque como uma alternativa viável, aproveitando resíduos da construção e demolição (RCD) como agregados reciclados. Este processo não apenas reduz a quantidade de resíduo gerado, mas também diminui a extração de recursos naturais, contribuindo para um ciclo de produção mais sustentável (LEVY, 2001; CUNHA, 2023; BORGES, 2023).

No entanto, a utilização de agregados reciclados no concreto pode impactar suas propriedades mecânicas e durabilidade, por exemplo no que se refere à carbonatação. A carbonatação é um processo químico onde o dióxido de carbono (CO_2) presente no ar se dissolve em água, formando ácido carbônico, que reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) também conhecido como cal hidratada do concreto, resultando na formação de carbonato de cálcio que é um composto químico amplamente encontrado na natureza, presente em minerais como calcita (CADORE, 2008). Esse fenômeno, embora possa melhorar algumas características do material, como a resistência à compressão em certas condições, também pode comprometer a durabilidade das estruturas ao reduzir o pH do concreto e, conseqüentemente, sua proteção contra a corrosão de armaduras (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Pauletti (2007), o avanço da frente de carbonatação está intimamente ligada à três fatores principais: facilidade que o gás carbônico encontra para difundir-se no interior do concreto; condições ambientais e às propriedades do concreto. A consequência mais evidente, além da diminuição da seção do concreto é a corrosão da armadura e, conseqüentemente, sua seção. Além disso, pode provocar a despassivação do aço e sua aderência com o concreto. A

corrosão induzida por carbonatação é normalmente associada a uma uniformidade do ataque. Segundo Parrot (1994), dados publicados para corrosão em concreto carbonatados em relação à influência da proporção da mistura de concreto, tipos de cimento e condições de cura são frequentemente difíceis de serem interpretados. Porém, o autor afirma que várias publicações indicam um crescimento exponencial da corrosão com o aumento da umidade acima de 70% até próximo da saturação.

As propriedades do concreto também são definidas pelo processo de execução do mesmo, principalmente a compactação e cura. A compactação deficiente pode intensificar a propagação da frente de carbonatação e a cura influencia diretamente na hidratação e formação da microestrutura do concreto. Com isso, quanto maior o grau de hidratação do cimento, maior será a densificação da matriz e menor será a taxa de penetração de agentes agressivos. Segundo Pereira (2001), um aumento no período de cura diminui significativamente a profundidade de penetração do gás carbônico. Neville (1997), explicita também que a ineficiência no processo de cura é bastante desfavorável ao concreto no processo de carbonatação.

Diante disso, é fundamental investigar como a substituição de agregados naturais por reciclados influencia o comportamento do concreto frente à carbonatação. Estudos têm mostrado que a composição, a textura e a porosidade dos agregados reciclados podem afetar a taxa de carbonatação, alterando a permeabilidade e a difusão do CO₂ no material (PEREIRA, 2021; SILVA, 2020; WERLE, 2011). Assim, a compreensão desses mecanismos é essencial para otimizar o uso de concretos reciclados, assegurando não apenas sua viabilidade econômica, mas também a segurança e a durabilidade das edificações.

Dessa forma, a carbonatação em concretos com agregados reciclados não é apenas um fenômeno físico-químico a ser estudado, mas uma oportunidade para reformular práticas na construção civil, promovendo a sustentabilidade e contribuindo para a redução da pegada de carbono da indústria (CADORE, 2008).

Para garantir maior resistência e durabilidade, o controle da mistura do concreto é essencial, envolvendo um bom empacotamento dos agregados e o uso de aditivos que auxiliam na redução da água no traço. Como destaca Carmona (2017), ao reduzir a quantidade de poros, as dosagens com menor relação água-cimento apresentam menores velocidades de carbonatação, podendo-se utilizar aditivos que aumentem ainda mais a impermeabilidade do concreto. O autor ressalta ainda que cimentos com menos adições são geralmente mais indicados para aumentar a vida útil das estruturas expostas à carbonatação, embora seja possível produzir concretos resistentes à carbonatação com todos os tipos de cimento, desde que seja adotado um traço adequado.

A durabilidade das estruturas de concreto é também abordada pela ABNT NBR 6118:2023, que define a durabilidade como a capacidade da estrutura de resistir às influências ambientais, considerando as condições de exposição desde a concepção do projeto. Complementarmente, a ABNT NBR 15575-1:2024 qualifica a durabilidade como a capacidade da edificação e de seus sistemas de desempenharem suas funções ao longo do tempo, sob condições de uso e manutenção específicas.

Esta pesquisa tem como objetivo analisar a influência da carbonatação em concretos produzidos com diferentes porcentagens de agregados reciclados, com foco em Goiânia e sua usina de reciclagem. O estudo busca entender as interações entre os componentes e suas implicações na durabilidade das estruturas, um aspecto crucial para promover o uso responsável e eficaz do concreto reciclado. Ao alinhar inovação na construção civil às demandas contemporâneas por soluções sustentáveis, essa análise se torna relevante para a construção civil moderna em Goiânia. Ela oferece alternativas que minimizam o impacto ambiental, garantindo ao mesmo tempo a qualidade e a durabilidade das estruturas.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para este estudo, foram moldados corpos de prova (CP's) de concreto com diferentes níveis de substituição de agregado miúdo reciclado, visando avaliar o desempenho do concreto frente ao fenômeno da carbonatação. A produção e cura dos CP's seguiram rigorosamente as normas técnicas brasileiras, em especial a NBR 12655:2015, que regulamenta o preparo e controle do concreto, e a NBR 5738:2016, que define os procedimentos para a moldagem e cura de corpos de prova.

Os ensaios de compressão foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UniAraguaia, localizado em Goiânia – GO. Esse laboratório conta com uma infraestrutura adequada para a realização de ensaios em materiais de construção, oferecendo acesso a equipamentos fundamentais para o processo de produção dos CP's, incluindo betoneiras, balanças de precisão, recipientes metálicos, moldes cilíndricos e tanques de cura. Essa estrutura é essencial para armazenar os CP's em condições controladas, bem como expô-los ao ambiente externo, possibilitando comparações em condições de ambiente protegido e exposto. Esse espaço é mostrado na Figura 1.

Figura 1. Laboratório de Materiais de Construção da UniAraguaia



Fonte: Autoria Própria

Os agregados reciclados utilizados na produção dos corpos de prova foram fornecidos pela empresa RNV Resíduos, também situada em Goiânia. A RNV Resíduos é especializada na reciclagem de materiais da construção civil, oferecendo agregados provenientes de resíduos processados. Na Figura 2, observa-se as instalações da RNV Resíduos, onde ocorre o processamento do concreto reciclado.

Figura 2. RNV Resíduos - Centro de Reciclagem de Materiais de Construção

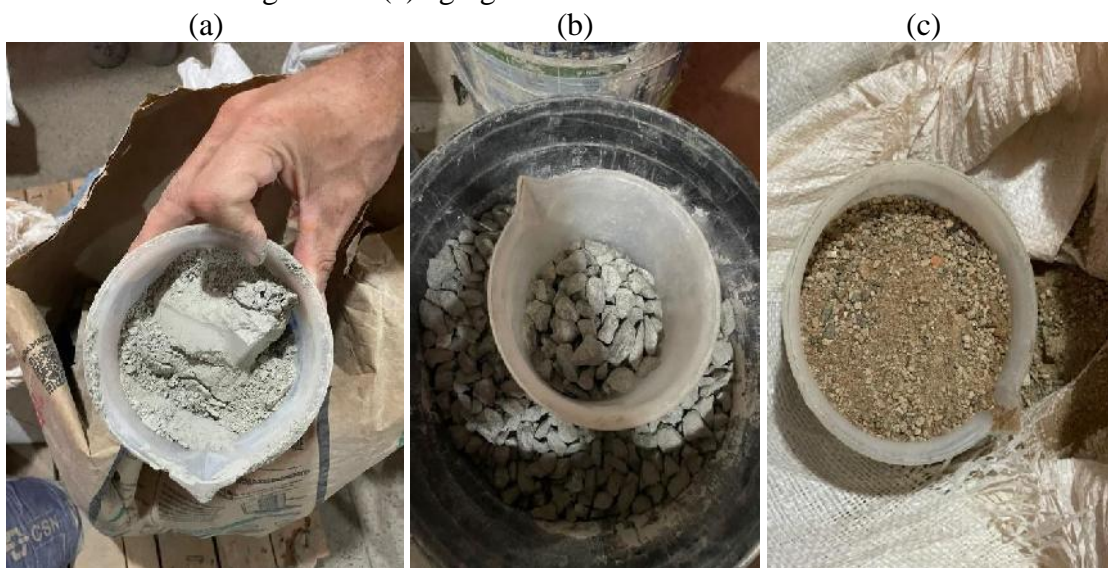


Fonte: RNV Resíduos

Composição dos Corpos de Prova

Os materiais que compõem os CP's incluem o cimento tipo CP2 F32 (Figura 3a), comum na região de Goiás, que foi selecionado devido à sua compatibilidade com os requisitos da pesquisa e à sua ampla disponibilidade. Para o agregado graúdo, foi utilizada brita zero, que possui granulometria adequada para o traço de concreto desejado (Figura 3b). O agregado miúdo natural foi parcialmente substituído por agregado miúdo reciclado (Figura 3c). A utilização do agregado reciclado visa não apenas testar a resistência do concreto à carbonatação, mas também avaliar o impacto da reciclagem de materiais de construção em termos de sustentabilidade. A utilização Superplastificante de alto desempenho Sika ViscoCrete-5700 visa melhoria da fluidez.

Figura 3. Materiais para a fabricação do concreto. (a) cimento tipo CP2 F32, (b) agregado graúdo e (c) agregado miúdo reciclado.



Fonte: Autoria Própria

As dimensões dos corpos de prova foram padronizadas em cilindros de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, e um total de 15 CP's foi produzido. Cada nível de substituição (0%, 10%, e 20%) contou com 5 CP's, assegurando um número suficiente de amostras para obtenção de dados representativos e estatisticamente confiáveis. Os materiais foram misturados conforme o método IPT/EPUSP, com uma relação água/cimento (A/C) de 0,50, resultando em uma composição de concreto adequada tanto para análise da carbonatação quanto para a resistência mecânica do material.

Traço do Concreto

O traço do concreto foi ajustado conforme o nível de substituição de agregado miúdo reciclado, com o objetivo de garantir uma mistura homogênea e que possibilite a correta análise dos resultados. As tabelas 1, 2 e 3 a seguir detalham as proporções de cada material para as diferentes composições.

Esses traços detalham a quantidade de cada material para composição do concreto para cada nível de substituição do agregado miúdo reciclado. A quantidade de agregado reciclado é proporcional ao nível de substituição, permitindo a comparação entre as diferentes proporções e sua influência sobre o desempenho do concreto.

Tabela 1. Traço do Concreto com 0% de Substituição de Agregado Miúdo Reciclado.

Traço do Concreto com 0% de Substituição		
Material	Quantidade	Unidade
Cimento (CP2 F32)	13,77	kg
Areia Natural	7,99	kg
Areia Reciclada	0	kg
Brita Zero	21,76	kg
Água	5,51	kg
Aditivo	41,31	g

Tabela 2. Traço do Concreto com 10% de Substituição de Agregado Miúdo Reciclado

Traço do Concreto com 10% de Substituição		
Material	Quantidade	Unidade
Cimento (CP2 F32)	14,19	kg
Areia Natural	6,58	kg
Areia Reciclada	0,8	kg
Brita Zero	22,42	kg
Água	4,97	kg
Aditivo	42,57	g

Tabela 3. Traço do Concreto com 20% de Substituição de Agregado Miúdo Reciclado

Traço do Concreto com 20% de Substituição		
Material	Quantidade	Unidade
Cimento (CP2 F32)	14,19	kg
Areia Natural	6,58	kg
Areia Reciclada	1,65	kg
Brita Zero	22,42	kg
Água	4,97	kg
Aditivo	42,57	g

Processo de Produção e Moldagem dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram moldados em cilindros de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, seguindo os procedimentos da NBR 5738:2016. O concreto foi preparado na betoneira e vertido nos moldes cilíndricos em duas camadas, sendo cada uma delas compactada com 12 golpes de haste para evitar a formação de vazios e garantir a homogeneidade do material. Após a moldagem, os CP's foram submetidos à cura em três diferentes ambientes, com a finalidade de simular condições variadas e observar sua influência na carbonatação. Na Figura 4, segue a imagem da: (a) forma para os corpos de prova e (b) da betoneira utilizada.

Figura 4. Forma para os corpos de prova.

(a) (b)



Fonte: Autorial Própria

Ambientes de Cura e Exposição

Os CP's foram expostos a três condições de cura. O primeiro grupo foi mantido em ambiente externo, especificamente em um estacionamento, simulando condições de exposição ao ar livre e a intempéries; o segundo grupo ficou no ambiente interno do laboratório, protegido de variações climáticas e, assim, simulando um ambiente controlado; e o terceiro grupo foi submerso em água, com o intuito de simular condições de umidade contínua e potencializar a

hidratação do cimento. Cada um dos ambientes de cura terá uma quantidade de CP's com 0%, 10% e 20% de substituição de agregado reciclado, distribuídos conforme o Quadro 1 a seguir:

Quadro 1. Divisão dos 15 CP's por nível de substituição e ambientes.

Nível de substituição	Ambiente Externo	Ambiente interno	Ambiente submerso
0%	2 CP's	1 CP	2 CP's
10%	2 CP's	1 CP	2 CP's
20%	2 CP's	1 CP	2 CP's

A exposição em diferentes ambientes permitiu a observação de como a umidade e a exposição ao ar influenciaram a profundidade da carbonatação nos CP's, proporcionando uma avaliação ampla do desempenho do concreto em condições diversas. Na Figura 5, são apresentadas imagens de cada ambiente: o ambiente externo, que corresponde ao estacionamento; o ambiente interno, que é o laboratório de materiais de construção; e o ambiente submerso, que é representado pelo tambor de plástico azul.

Figura 5. Ambientes: (a) Externo, (b) Interno, (c) Submerso.



Fonte: Autoria Própria

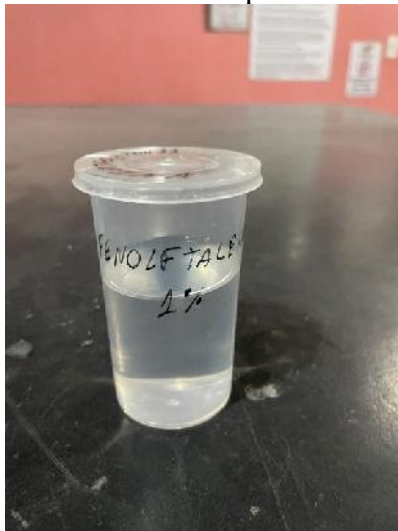
Ensaio de Carbonatação

Após 14 dias de cura, foi realizado o ensaio de aspersão de fenolftaleína para verificar a profundidade da carbonatação nos corpos de prova. Esse ensaio consiste em um método amplamente aceito para a avaliação da carbonatação em estruturas de concreto.

Para a realização do ensaio, cada corpo de prova foi seccionado transversalmente, de modo a expor a área interna do material. As superfícies seccionadas foram preparadas, mantendo-as limpas e secas, possibilitando uma reação uniforme com a fenolftaleína. Em

seguida, uma solução de fenolftaleína a 1% em álcool foi aspergida sobre as superfícies dos CP's. A Figura 6 mostra o frasco de fenolftaleína. Após a aplicação, foram observadas as mudanças de cor nas áreas expostas, sendo que as regiões não carbonatadas se manifestaram em coloração roxa ou rosa intensa, enquanto as áreas carbonatadas permaneceram incolores.

Figura 6. Solução de fenolftaleína para ensaio de carbonatação.



Fonte: Autoria Própria

Já para mensurar a profundidade da carbonatação, foi utilizada uma régua milimetrada ou paquímetro, conforme ilustrado na Figura 7, que mede a distância entre a superfície externa do CP e o limite da coloração da fenolftaleína. A profundidade da carbonatação foi avaliada em corpos de prova que foram submetidos a três condições de cura: ambiente externo, ambiente interno e submerso. Um CP de cada nível de substituição (0%, 10% e 20%) foi testado em cada ambiente, possibilitando uma análise comparativa entre as diferentes condições e níveis de substituição.

Figura 7. Equipamento para medição da profundidade de carbonatação.



Fonte: Autoria Própria

Essa avaliação comparativa entre os diferentes níveis de substituição de agregados e ambientes de exposição permitiu determinar a eficácia da resistência do concreto com agregado

reciclado contra a carbonatação, considerando-se a variabilidade dos ambientes de cura e o teor de substituição do agregado miúdo reciclado.

Caracterização do Concreto e Ensaios Físicos

Para caracterizar o concreto fresco, foi realizado o *Slump Test* de acordo com a norma NBR NM 67:1998. Esse ensaio avalia a trabalhabilidade e a consistência da mistura e foi realizado imediatamente após sua produção. O equipamento para o *Slump Test*, incluindo o molde tronco-cônico e os instrumentos de medição está ilustrado na Figura 8.

Figura 8. Equipamento para realização do *Slump Test*.



Fonte: Autoria Própria

Após 28 dias de cura, foi realizado o ensaio de resistência à compressão, de acordo com a norma NBR 5739:2018, para avaliar a capacidade de carga do concreto endurecido. Um CP de cada nível de substituição foi testado nos ambientes externo e submerso. A máquina de ensaio de compressão, ilustrada na Figura 9, foi utilizada para a execução dos testes, fornecendo dados comparativos entre as diferentes substituições e condições de cura.

Figura 9. Máquina de ensaio de compressão para avaliação dos corpos de prova.



Fonte: Autorial Própria

Análise dos Resultados

A análise dos resultados foi feita comparando a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão dos CP's entre os diferentes níveis de substituição de agregado reciclado e condições de cura. Os valores obtidos para a profundidade da carbonatação e resistência foram registrados e avaliados para cada CP, possibilitando uma análise detalhada sobre o efeito da carbonatação e a eficácia da substituição do agregado reciclado nas condições ambientais variadas. Esses dados permitiram uma melhor compreensão da durabilidade e resistência do concreto com agregado reciclado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir do ensaio de carbonatação e compressão realizado em corpos de prova de concreto com agregado reciclado. O objetivo deste experimento foi avaliar o comportamento do concreto submetido a um ambiente de carbonatação, considerando o uso de agregados provenientes da reciclagem de resíduos da construção civil. Serão discutidas as influências da substituição parcial do agregado natural por material reciclado nas propriedades do concreto, incluindo a profundidade de carbonatação e o impacto nas características de durabilidade do material. A análise da busca fornece uma visão abrangente sobre os resultados do uso de agregados reciclados em concretos expostos a condições ambientais adversas.

3 Caracterização do Concreto

A caracterização inicial dos corpos de prova envolveu ensaios de produção, conforme ilustra a Figura 10.

Figura 10. Corpos de prova produzidos.



Fonte: Autorial Própria

Na imagem, observa-se o processo de moldagem e organização dos CP's, garantindo a uniformidade necessária para os testes subsequentes. A produção seguiu os parâmetros descritos na metodologia, priorizando a precisão das dosagens e o controle das variáveis

experimentais. Após a moldagem, foi realizado o teste de consistência (*Slump test*), conforme representado na Figura 11.

Figura 11. Teste de *Slump*.



Fonte: Autoria Própria

O teste permitiu avaliar a fluidez e trabalhabilidade do concreto fresco. O Quadro 2 apresenta os resultados obtidos. Os resultados indicam que a substituição de agregados naturais por reciclados alterou a consistência do concreto. No entanto, com 20% de substituição, a trabalhabilidade foi reduzida, possivelmente devido ao aumento da porosidade do agregado reciclado.

Quadro 2. Resultados dos testes de *Slump*.

Nível de Substituição	<i>Slump Test</i> (cm)
0%	1,0
10%	2,5
20%	0,9

Posteriormente, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, representado na Figura 12, que ilustra o momento do teste.

Figura 12. Ensaio de resistência a compressão.



Fonte: Autoria Própria

Esse ensaio permitiu determinar a capacidade do concreto de suportar cargas axiais, considerando diferentes condições de cura. Os dados coletados estão sintetizados no Quadro 3

Quadro 3. Resultados do ensaio de resistência a compressão.

Nível de Substituição CPs	Cura Estacionamento Resistência (Mpa)	Cura Mergulhado Resistência (Mpa)
0%	17.21	15.95
10%	22.79	13.94
20%	20.74	11.83

Os resultados demonstram que o concreto com 10% de substituição apresentou a maior resistência à compressão, especialmente nas condições de cura no estacionamento. Este comportamento está associado à melhor compactação da matriz cimentícia, enquanto as amostras com 20% de substituição apresentaram redução significativa de resistência, evidenciando maior susceptibilidade às condições de cura submersa. Estes resultados refletem as análises realizadas para avaliar a resistência à análise dos corpos de prova de concreto, considerando diferentes condições de cura e níveis de substituição de agregado reciclado.

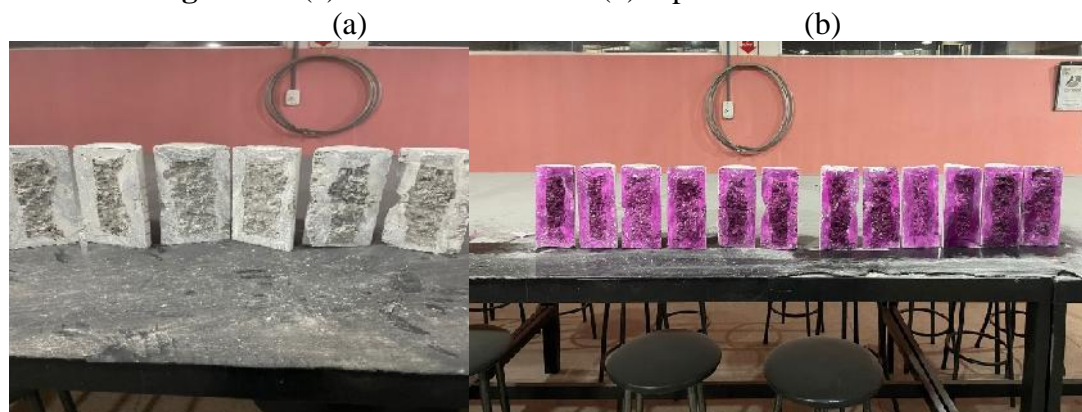
Após a análise comparativa com a tabela de Mendes, Ana; Paganin, Ricardo (2020), observa-se que o concreto de referência é classificado como concreto convencional. Por outro lado, os concretos com 10% e 20% de substituição de resíduos de construção e demolição (RCD) apresentam características que os classificam como concretos deficientes, principalmente devido à elevada porosidade. Essa porosidade excessiva permite a percolação da água entre os poros do concreto, o que resulta em um maior encharcamento da estrutura.

Ensaio de Carbonatação

O ensaio de carbonatação foi realizado com o objetivo de avaliar a profundidade da reação química entre o dióxido de carbono (CO_2) e os componentes da matriz cimentícia dos corpos de prova. Para isso, utilizou-se a fenolftaleína como indicador químico, que evidencia áreas de pH elevado por meio de coloração rosada. O procedimento envolveu o seccionamento dos CP's e a aspersão imediata da solução de fenolftaleína nas superfícies expostas, permitindo a identificação das áreas que permaneceram alcalinas e aquelas que sofreram carbonatação.

Na Figura 13, é possível observar as etapas do ensaio de carbonatação. Na imagem (a), estão representados os CP's após o corte transversal, expondo suas superfícies internas que foram submetidas à aspersão da fenolftaleína, como mostrado na imagem (b). O procedimento foi conduzido logo após o período de cura especificado, conforme detalhado no Quadro 4.

Figura 13. (a) CP's seccionados e (b) aspersão da fenolftaleína.



Fonte: Autoria Própria

Quadro 4. Datas intervalo de tempo, cura, corte e imediatamente a aspersão.

Nível de Substituição	Cura	Corte	Imediatamente a aspersão fenolftaleína.
0%	08/10/2024 a 23/10/2024	23/10/2024	23/10/2024
10%	08/10/2024 a 23/10/2024	23/10/2024	23/10/2024
20%	08/10/2024 a 23/10/2024	23/10/2024	23/10/2024

A organização do experimento permitiu garantir a padronização das condições de cura, corte e aplicação da solução de fenolftaleína. Após o corte e aspersão, os CPs foram posicionados nos três ambientes de exposição previamente definidos: externo (estacionamento), interno (laboratório) e submerso (tanque com água). A Figura 14 ilustra os CP's em seus respectivos ambientes de exposição, permitindo a visualização inicial das condições experimentais adotadas.

Figura 14. CP's expostos nos ambientes: (a) Externo, (b) Interno, (c) Submerso.

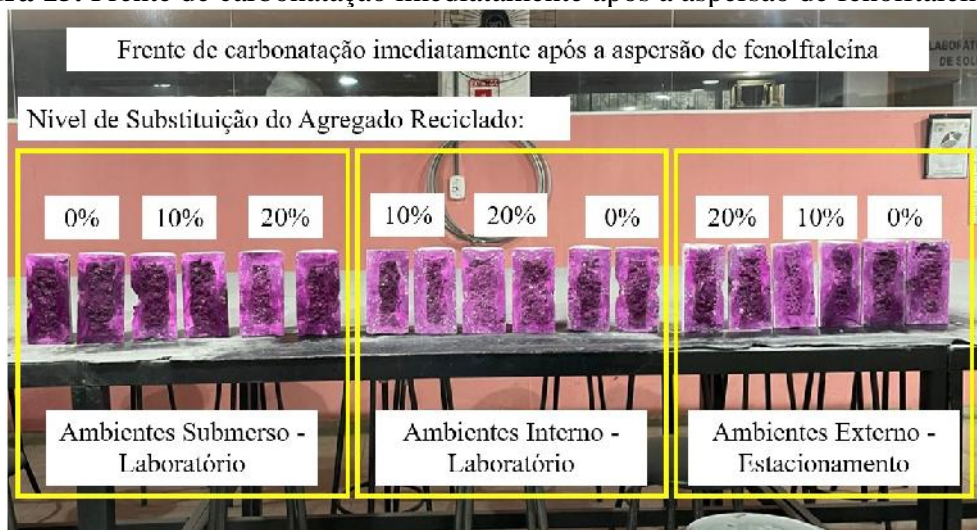


Fonte: Autoria Própria

Assim, os resultados obtidos para a avaliação da carbonatação nos corpos de prova, após a aspersão de fenolftaleína, demonstraram variações significativas na coloração dos concretos com diferentes porcentagens de substituição de agregados reciclados e em diferentes ambientes de exposição. A seguir, apresentamos as observações e discussões dos resultados em cada um dos ambientes analisados.

Imediatamente após a aspersão de fenolftaleína, todos os corpos de prova apresentaram uma coloração integralmente rosada, sem a formação de bordas definidas para medição da profundidade da carbonatação. Essa coloração indica que a matriz de concreto ainda está alcalina e não sofreu carbonatação significativa. No entanto, observaram-se pequenas variações na intensidade da coloração conforme os diferentes ambientes (Figura 15). No ambiente submerso, os corpos de prova exibiram uma coloração violeta forte, indicando pouca interação entre o CO₂ e a matriz do concreto. No ambiente externo (estacionamento), algumas áreas apresentaram uma coloração violeta forte, enquanto no ambiente interno (laboratório), os corpos de prova apresentaram uma coloração menos intensa o que significa a interação com o CO₂ e a matriz do concreto.

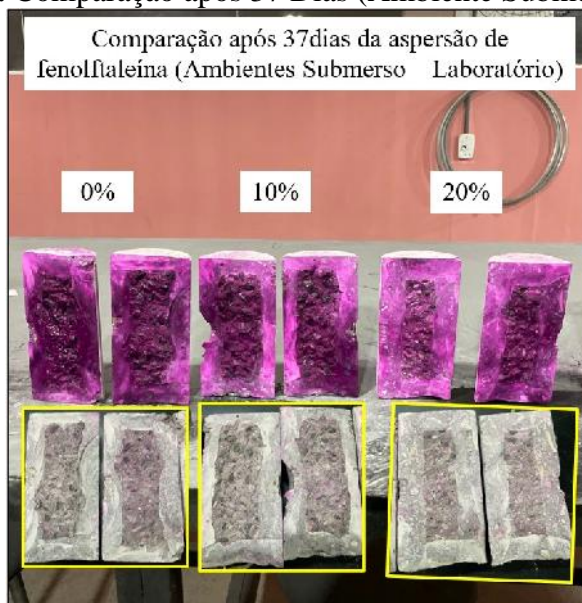
Figura 15. Frente de carbonatação imediatamente após a aspersão de fenolftaleína



Fonte: Autoria Própria

Após 37 dias da aspersão de fenolftaleína, os corpos de prova expostos ao ambiente submerso (Figura 16) mostraram, de maneira geral, uma coloração incolor, com algumas manchas claras de coloração rosada. Para o corpo de prova com 0% de substituição de agregados reciclados, foi observada uma leve coloração rosada ao redor dos agregados. No corpo de prova com 10% de substituição, a coloração rosada foi observada na área de contorno dos agregados, similar à observada no corpo de prova com 0% de substituição, além de algumas manchas no agregado graúdo. Para o corpo de prova com 20% de substituição, a coloração rosada foi mais aparente ao redor dos agregados, com algumas manchas no agregado graúdo um pouco mais intensas.

Figura 16. Comparação após 37 Dias (Ambiente Submerso)



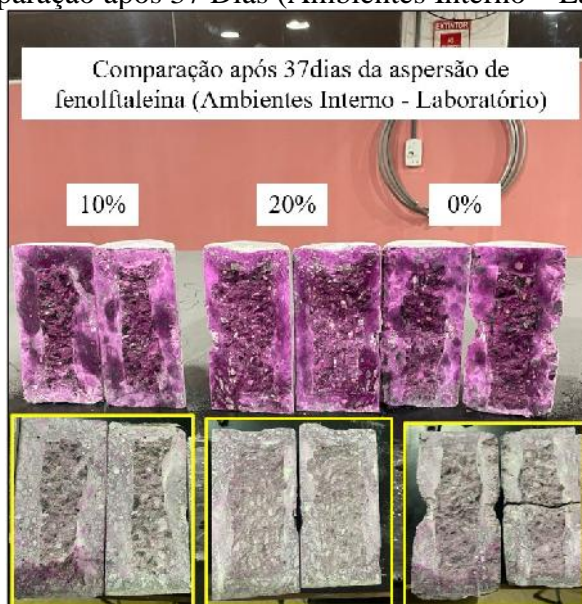
Fonte: Autoria Própria

A Figura 17 apresenta os corpos de prova expostos ao ambiente interno (laboratório), onde após 37 dias, também foi observada uma coloração incolor predominante, com algumas manchas rosadas, de intensidade maior em comparação aos corpos de prova dos ambientes

submerso. No corpo de prova com 0% de substituição, a coloração rosada foi leve, similar à observada no 20% de substituição do ambiente submerso. O corpo de prova com 10% de substituição apresentou uma leve coloração rosada ao redor dos agregados. O corpo de prova com 20% de substituição exibiu uma coloração rosada mais aparente ao redor dos agregados, similar ao observado no ambiente submerso, mas ainda com intensidade moderada. Vale destacar que, devido a umidade na parte inferior dos CP's causada pela lavagem do laboratório, o comportamento observado pode ter sido parcialmente afetado.

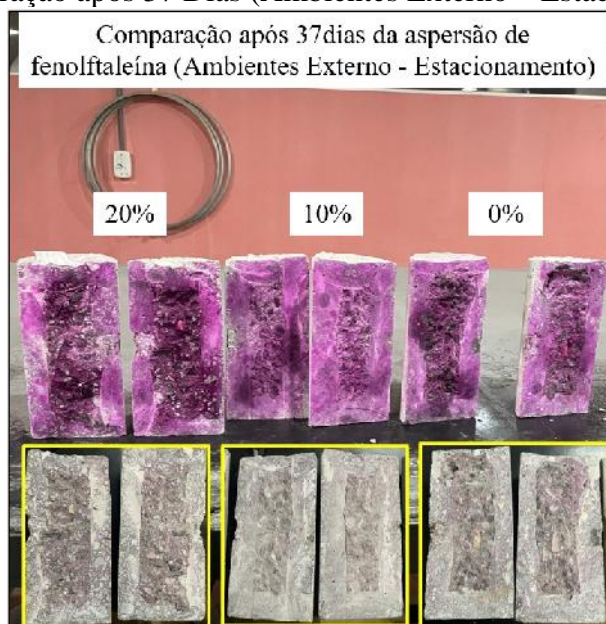
A Figura 18 apresenta os corpos de prova curados em ambiente externo (estacionamento), que por sua vez apresentaram uma coloração geral incolor, com manchas rosadas, semelhante ao observado no ambiente interno do Laboratório. O corpo de prova com 0% de substituição de agregados reciclados exibiu uma leve coloração rosada ao redor dos agregados, enquanto o corpo de prova com 10% de substituição apresentou uma coloração rosada mais suave ao redor dos agregados, com intensidade inferior à observada no corpo de prova com 0% de substituição. O corpo de prova com 20% de substituição apresentou uma coloração rosada mais aparente ao redor dos agregados.

Figura 17. Comparação após 37 Dias (Ambientes Interno – Laboratório)



Fonte: Autoria Própria

Figura 18. Comparação após 37 Dias (Ambientes Externo – Estacionamento)



Fonte: Autoria Própria

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ausência de coloração rosada significativa em todas as regiões expostas dos corpos de prova indica que não ocorreu reação alcalina nas superfícies avaliadas, impossibilitando a medição da profundidade de carbonatação, inclusive nos corpos de prova com 0% de substituição de agregado reciclado. Isso reflete uma elevada porosidade na composição do concreto utilizado na análise, o que resulta em uma matriz cimentícia mais permeável, facilitando a penetração de CO_2 e, conseqüentemente, a carbonatação em todos os níveis de substituição e ambientes analisados. De acordo com Levy (2001), a difusão do CO_2 é mais influenciada pela relação água/cimento e pelo consumo de cimento do que pela natureza dos agregados reciclados, o que pode justificar os resultados obtidos.

Embora a diferença nas intensidades de coloração observadas nos diferentes ambientes de exposição seja mínima, ela sugere que as condições de cura e a exposição ao CO_2 influenciam o comportamento de carbonatação nos corpos de prova. A maior intensidade de coloração rosada observada nos corpos de prova expostos ao ambiente interno (laboratório) e ao ambiente externo (estacionamento) pode ser atribuída à maior interação com o CO_2 presente nessas condições. Em contraste, a menor intensidade de coloração no ambiente submerso reflete a menor concentração de CO_2 disponível nesse ambiente. Esses resultados estão em concordância com as observações de Mehta e Monteiro (2008), que destacam o impacto das condições ambientais nos mecanismos de degradação química e física do concreto.

Além disso, a maior substituição de agregados miúdos reciclados nos concretos resultou em uma leve redução da porosidade da matriz cimentícia, dificultando a penetração do CO_2 e, conseqüentemente, a carbonatação. Essa tendência foi evidenciada por uma intensidade ligeiramente maior da coloração rosada nos corpos de prova com maior substituição de agregados reciclados. Esses resultados indicam que a utilização de agregados reciclados pode influenciar a durabilidade do concreto, tornando-o mais ou menos suscetível à carbonatação, um fator crucial para a longevidade das estruturas, especialmente em ambientes agressivos.

Conforme Mehta e Monteiro (2008), os efeitos deletérios no concreto, como a carbonatação, podem ser mitigados por estratégias que incluem a redução da permeabilidade e o uso de aditivos. Levy (2001) destaca que o tipo de agregado reciclado utilizado não influencia

diretamente a difusão de CO₂, embora o manuseio inadequado e a presença de contaminantes possam comprometer as propriedades do concreto, conforme apontado por John e Agopyan (2000) e Del Rey et al. (2015). Nesse contexto, a homogeneidade dos resultados observada, independentemente do ambiente e do nível de substituição, evidencia o bom processamento realizado na usina de reciclagem.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655:2015: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67:1998. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738:2016: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2023. Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-1:2024. Edificações Habitacionais-Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BORGES, L. L.; MARQUES, P. S.; de OLIVEIRA, J. C. A.; LIMA, F. X. R. F.; COSTA, L. F. (*In Memoriam*). Gestão de resíduos de construção e demolição: visão geral e proposta para Goiânia – GO. **Rev. Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Palhoça, v.12, n. esp., p. 1-14, 2023.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**, Tese, USP, São Carlos, SP, 2007.

CADORE, W. W. **Estudo da carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada**. Tese. UFSM, Santa Maria, RS, 2008.

CARMONA, T. Mapeamento da concretagem traz informações essenciais sobre elementos concretados. **Mapa da Obra**, jan. 2017. Disponível em: <<http://www.mapadaobra.com.br/inovacao/mapeamento-da-concretagem-trazinformacoes-essenciais-sobre-elementos-concretados/>>. Acesso em: 04 set. 2017.

CUNHA, K. da S.; ROBERTO, J. C. A.; SOUTO, S. P.; LIMA, S. C.. Resíduos sólidos na construção civil no Brasil. **Revista GeSec**, São Paulo, SP, Brasil, v. 14, n. 6, p. 8671-8692, 2023. DOI: <http://doi.org/10.7769/gesec.v14i6.2255>. ISSN: 2178-9010.

DEL REY, I.; AYUSO, J.; GALVIN, A.P.; JIMENEZ, J.R.; LOPEZ, M.; GARCIAGARRIDO, M.L. Analysis of chromium and sulphate origins in construction recycled materials based on leaching test results. **Waste Management**, v. 46, p. 278–286, 2015.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduo da construção**. São Paulo, 2000. 13 p.

LEVY, S.M. **Contribuição ao estudo da durabilidade e concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. São Paulo-SP, 2001. 194 p. Tese. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

LIMA, S. F., LIMA, C. I. V., COUTINHO, C. O. D., AZEVEDO, G. G. C., BARROS, T. Y. G., & TAUBER, T. C. (2014). Concreto e suas inovações. **Caderno De Graduação - Ciências Exatas E Tecnológicas - UNIT - ALAGOAS**, 1(1), 31–40, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1ª Edição. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MENDES, A.; PAGANIN, R.. **Análise da carbonatação do concreto com substituição do agregado graúdo por concreto reciclado**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Assis Gurgacz, Cascavel, PR, 2020.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2ª ed., Pini, São Paulo, 1997.

PARROT, L. J. A study of carbonation-induced corrosion. **Magazine of Concrete Research**, v. 46, n. 166, p. 23-28, 1994.

PAULETTI, C., POSSAN, E., Dal MOLIN, D. C. C. **Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 7-20, 2007.

PEREIRA, V. G. A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura**. Dissertação UFRGS, 2001.

PEREIRA, F. C.; LEAL, C. E. F.; FERREIRA, F. G. da S. Efeitos da Nanossílica no Desempenho e na Durabilidade de Concretos Submetidos ao Ataque de CO₂. **Revista Concreto IBRACON**, ed. 103, p. 68-72, jul.-set. 2021.

SILVA, N. C.; MALHEIROS, R.; CAMPOS, A. C.. A reciclagem e o destino final dos resíduos sólidos de construção e demolição produzidos no município de Goiânia. In: **IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, Salvador, BA, 25 a 28 nov. 2013.

SILVA, H. C.; MELO, F. P. **Carbonatação do concreto: Análise comparativa da profundidade de carbonatação em concretos com agregados convencionais e reciclados**. MG, 2020.

WERLE, A. P.; KAZMIERCZAK, C. de S.; KULAKOWSKI, M. P..Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. **Artigos Ambientais de Construção**, v. 11, n. 2, Cristo Rei, São Leopoldo - RS, 2011.

