

COMPORTAMENTO FÍSICO-MECÂNICO DE CONCRETOS CONTENDO AGREGADOS RECICLADOS

VICTOR IVANILDO GOMES DA SILVA¹; JULIANO DE FREITAS DUTRA²

¹Graduando em Engenharia Civil, UNIFACIG, 2010221@sempre.unifacig.edu.br

²Mestre e Engenheiro Civil, UNIFACIG, juliano.dutra@sempre.unifacig.edu.br

RESUMO

O setor da construção civil contribui significativamente para a degradação ambiental devido à extração intensiva de recursos naturais e à grande geração de resíduos. Em Manhuaçu/MG, a expansão da indústria da construção resultou em um aumento na produção de resíduos de construção e demolição, estimado em cerca de 46 mil toneladas anuais, os quais muitas vezes não recebem destinação ou reaproveitamento adequados, ampliando os impactos ambientais. Diante deste cenário, e considerando o crescente impacto ambiental causado pelo descarte inadequado desses resíduos, este trabalho tem como objetivo principal avaliar a resistência à compressão axial de concretos produzidos com a substituição de 15% de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado, contribuindo para práticas mais sustentáveis na construção civil e destinação correta desses resíduos. Os materiais utilizados foram coletados em uma concreteira localizada em Manhuaçu/MG. Os resíduos foram caracterizados quanto às suas propriedades físicas e mecânicas. O procedimento experimental adotado incluiu a produção de concretos reciclados e a realização de ensaios de resistência à compressão axial avaliados aos 14 e 28 dias de cura. Os resultados indicaram que a substituição parcial permitiu obter uma boa trabalhabilidade do concreto. No entanto, a resistência mecânica do material não apresentou um crescimento significativo ao final do período de 28 dias, mantendo-se em valores médios de 32,3% de acréscimos em sua resistência mecânica. Os resultados demonstraram que o concreto com agregado miúdo reciclado não apresentou resultados satisfatórios inicialmente, necessitando assim de mais estudos e ajustes no traço utilizado.

Palavras-chave: Construção civil; Resíduos de construção e demolição; Concreto reciclado.

PHYSICAL-MECHANICAL BEHAVIOR OF CONCRETES CONTAINING RECYCLED AGGREGATES

ABSTRACT

The construction sector significantly contributes to environmental degradation due to the intensive extraction of natural resources and the large generation of waste. In Manhuaçu/MG, the expansion of the construction industry has resulted in an increase in the production of construction and demolition waste, estimated at approximately 46,000 tons annually, which often do not receive proper disposal or recycling, amplifying environmental impacts. Given this scenario, and considering the growing environmental impact caused by the improper disposal of this waste, this study aims to evaluate the compressive strength of concrete produced with the replacement of 15% of natural fine aggregate with recycled fine aggregate, contributing to more sustainable construction practices and the proper disposal of this waste. The materials used were collected from a concrete plant located in Manhuaçu/MG. The waste was characterized in terms of its physical and mechanical properties. The experimental procedure included the production of recycled concrete and the performance of compressive strength tests at 14 and 28 days of curing. The results indicated that the partial replacement allowed for good workability of the concrete. However, the material's mechanical strength did not show significant growth at the end of the 28-day period, maintaining average increases of 32.3% in its mechanical strength. The results demonstrated that concrete with recycled fine aggregate did not initially present satisfactory results, thus requiring further studies and adjustments in the mix used.

Keywords: Construction industry; Construction and demolition waste; Recycled concrete.

INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é um ramo de grande impacto na economia mundial, estando diretamente relacionado à produção de insumos, equipamentos, serviços gerados e à criação de empregos, e com isso, a intensa atividade deste setor resulta em um grande volume de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) (DUTRA, 2021).

Segundo Paulino (2023) no Brasil, as primeiras investigações científicas sobre o uso de agregados reciclados provenientes de RCD foram conduzidas por Pinto (1986) e Levy (1997) em argamassas, Bodi (1997) em pavimentação, e Zordan (1997) em concretos. Em 1999, Pinto (1986) reafirmou a importância do tema indicando que os RCD podem representar mais de 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos. Portanto, desde o ano 2000, diversas pesquisas experimentais têm sido realizadas, abordando aspectos como a variabilidade dos agregados (ANGULO, 2000) e o uso de agregados reciclados em concretos (ALTHEMAN, 2002; ANGULO, 2005; LEITE, 2001).

Nos últimos anos, muitos estudos sobre a reciclagem desses resíduos vêm sendo desenvolvidos para que estes materiais possam substituir agregados naturais, componentes dos materiais cimentícios, que são extraídos da natureza (KISKU, 2017). Entretanto, o uso de agregados reciclados enfrenta desafios significativos.

Um dos principais obstáculos é a variabilidade em sua composição que pode afetar a consistência e a qualidade do concreto produzido (LEVY, 2001). Além disso, a presença de contaminantes nos RCD pode prejudicar as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto (POON e CHAN, 2006). Ainda de acordo com esses autores, a limpeza e o processamento adequado dos agregados reciclados são essenciais para minimizar esses impactos negativos.

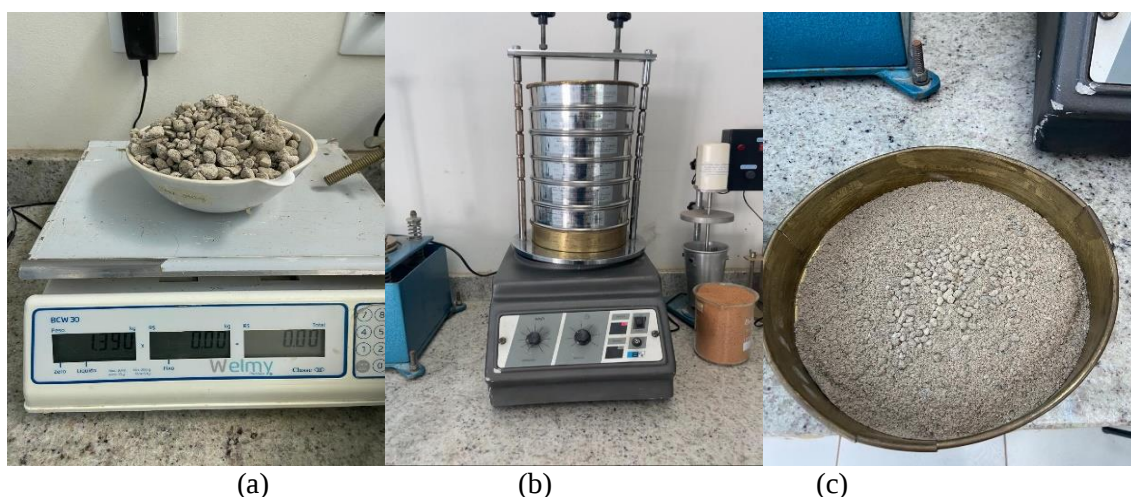
Dentro de uma matriz cimentícia, seja argamassa ou concreto, o agregado é um elemento fundamental para a produção desses materiais, e sua qualidade interfere diretamente nas propriedades finais que se deseja alcançar. Portanto, a caracterização dos agregados é crucial para avaliar sua adequação ao tipo de inserção pretendida (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Portanto, este estudo visa caracterizar os resíduos de construção e demolição gerados em Manhuaçu/MG e utilizá-los na produção de concretos reciclados com substituição de 15% de agregados naturais por agregados miúdos reciclados para concretos dosados para 30MPa.

METODOLOGIA

Neste estudo foi realizada a substituição do Agregado Miúdo Natural (AMN) por Agregado Miúdo Reciclado de Concreto (AMRC), proveniente de resíduos de demolição. Os agregados reciclados foram utilizados na fração de 3,36 mm, com um teor de substituição de 15%. Foram, portanto, produzidas duas misturas: uma contendo apenas agregado miúdo natural (NAT) e outra com 15% do agregado miúdo natural substituído por agregado miúdo reciclado.

Os resíduos utilizados foram coletados na empresa Concrelagos, localizada em uma área de descarte próxima à pedreira em Manhuaçu/MG. Após a coleta, o material foi beneficiado para se tornarem agregados miúdos reciclados, com foco na produção de areia média. O processo ocorreu no laboratório de solos da UNIFACIG, onde os materiais foram britados e peneirados em sete malhas de 4,75 mm a 0,075 mm. O peneiramento foi feito em mesa vibratória por 10 minutos, garantindo uma distribuição granulométrica uniforme. A Figura 1 apresenta o processo descrito.



(a) (b) (c)
Figura 1 - (a) Material bruto; (b) Peneiramento; (c) Material peneirado
Fonte: O autor, 2024.

Dosagem e composição das misturas

A dosagem dos concretos foi baseada no Método de Empacotamento Compressível (MEC), desenvolvido por De Larrard (1999) e utilizado por Costa (2021), que busca minimizar a porosidade dos grãos para reduzir a quantidade de ligante necessária. O MEC considera individualmente as propriedades dos materiais e segue princípios científicos, como observação, formulação de hipóteses e validação experimental. A Tabela 1 apresenta a dosagem utilizada.

Tabela 1 - Traços de moldagem

TRAÇO	Materiais					
	Brita 0 (kg)		Areia (kg)	Cimento (kg)	Água (kg)	SP (kg)
	NAT	RCA				
C30 NAT	13,33	0,00	13,82	4,65	3,06	0,04
C30 RCD	13,30	2,07	11,72	4,76	3,08	0,04

Fonte: O autor, 2024.

Produção, moldagem e cura dos copos de prova

Os concretos foram preparados utilizando um misturador tipo betoneira, com capacidade de 150 litros, fabricado pela MENEGOTTI. Inicialmente, o misturador foi umedecido com água, sendo removido qualquer excesso com um pano úmido. Em seguida, os agregados foram adicionados na ordem específica, começando pela brita 0 e, posteriormente, pela areia, visando evitar a aderência da areia às paredes da betoneira. Os materiais foram misturados por um minuto para garantir uma homogeneização adequada. Posteriormente, foi adicionada 50% da quantidade total de água à mistura, acionando-se a betoneira por mais um minuto. Após essa etapa, o cimento CPV foi incorporado e misturado por mais um minuto. Em seguida, o restante da água foi adicionado, juntamente com o superplastificante Camargo químico PN 7025. Por fim, a mistura foi processada por mais oito minutos. O tempo total de mistura, a partir da adição da água, foi de aproximadamente dez minutos. A Figura 2 ilustra as etapas descritas.

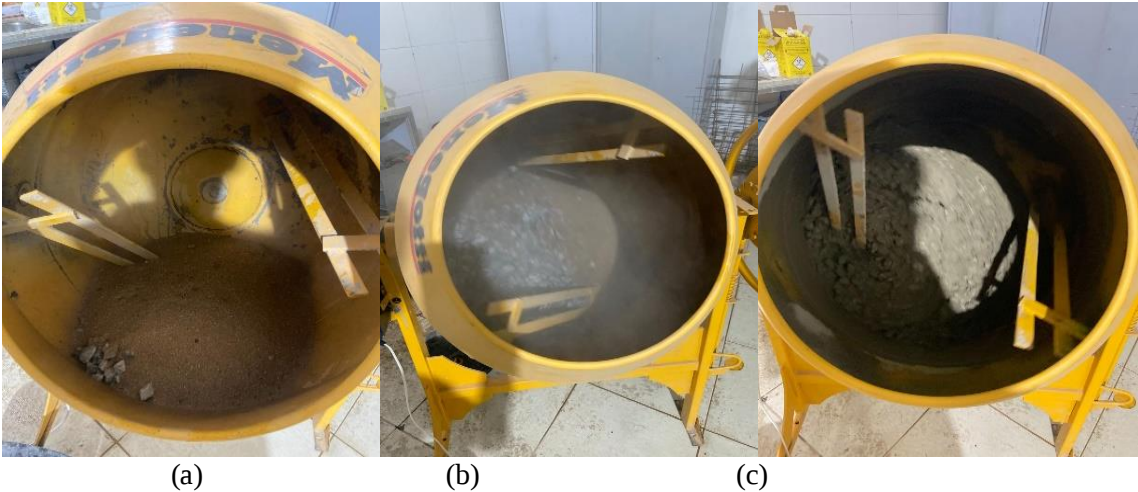


Figura 2 - (a) Inserção dos agregados; (b) Inserção do CPV e início da mistura; (c) Mistura pronta. Fonte: O autor, 2024.

Após o término do processo de mistura, iniciou-se a moldagem dos corpos de prova, conforme o procedimento de adensamento manual estipulado pela ABNT NBR 5738:2015. Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos nos moldes por 24 horas em um ambiente úmido, a fim de preservar a umidade do concreto. Em seguida, os corpos de prova

foram submersos em um tanque de cura, onde permaneceram até atingirem as idades necessárias para a realização dos ensaios. A Figura 3 ilustra o processo de moldagem e cura dos corpos de prova.

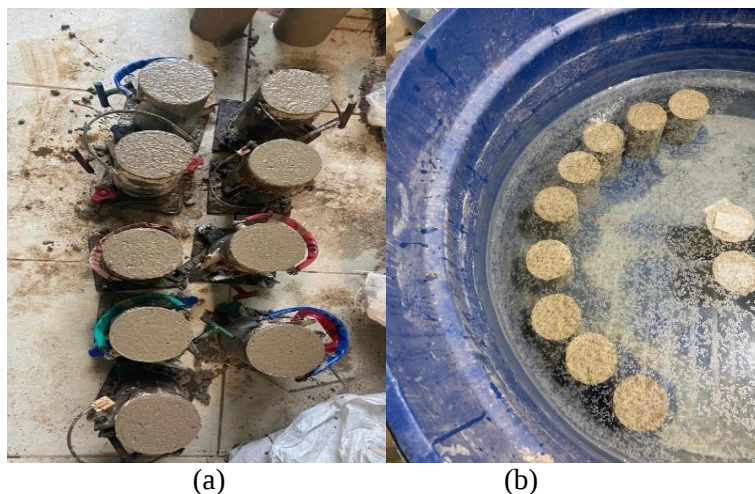


Figura 3 - (a) Moldagem dos corpos de provas; (b) Cura dos corpos de provas. Fonte: O autor, 2024.

Caracterização dos materiais e dos concretos produzidos

Os materiais utilizados foram caracterizados diante sua granulometria de acordo com a ABNT NBR 17054:2022 e absorção de água de acordo com a NBR NM 30 (2001). Já os concretos produzidos foram caracterizados diante a determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, de acordo com a ABNT NBR 16889 (2020) e resistência à compressão axial, de acordo com a ABNT NBR 5739 (2018). Para cada idade de ruptura, foram preparados três corpos de prova com dimensões de 10 x 20 cm, submetidos a períodos de cura de 14 e 28 dias. As rupturas dos corpos de prova foram executadas utilizando uma prensa Paviteste, modelo 3025A 054 05/93. Antes de cada ensaio, os corpos de prova passaram por um processo de faceamento para garantir a planicidade e regularidade das extremidades, em conformidade com as especificações normativas. A Figura 4 demonstra o processo de ruptura.



Figura 4 – (a) Retificação do corpo de prova; (b) Carga aplicada ao corpo de prova na prensa; (c) Ruptura do corpo de prova. Fonte. O autor, 2024.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Granulometria

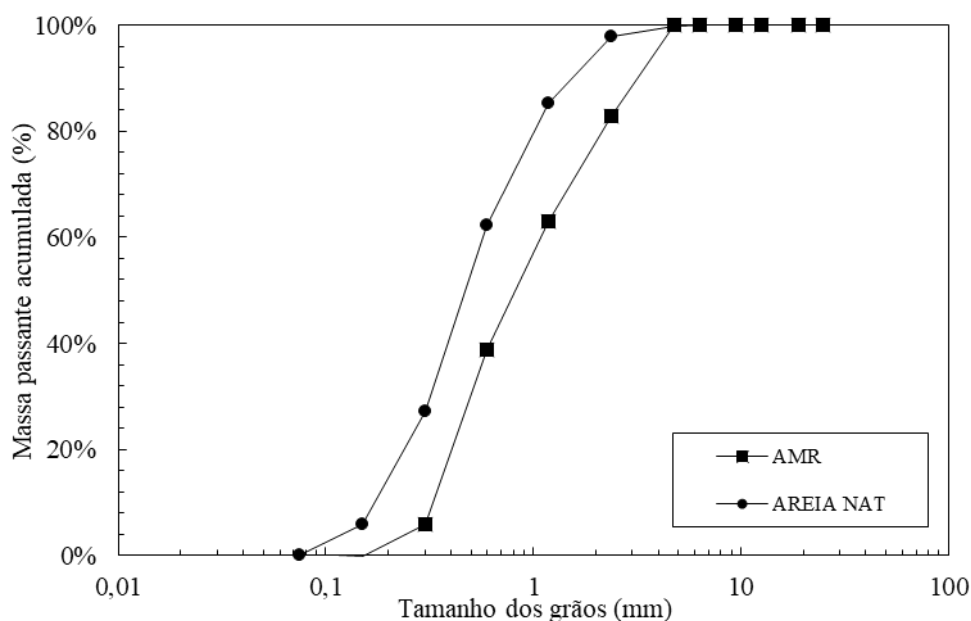
Durante o ensaio de granulometria, conforme o Gráfico 1, observou-se que a granulometria da areia reciclada é significativamente mais grossa em comparação com a da areia natural. Essa diferença pode ser atribuída à natureza dos agregados reciclados, que tendem a possuir partículas mais angulares e menos uniformes devido ao processo de britagem dos resíduos de concreto. O módulo de finura do resíduo de concreto reciclado foi determinado em 3,09, indicando uma granulometria mais grossa, enquanto o módulo de finura da areia natural foi de 2,20, o que reflete uma distribuição granulométrica mais fina. Esses resultados, conforme apresentados na Tabela 2, são fundamentais para compreender o impacto da granulometria na trabalhabilidade e nas propriedades mecânicas do concreto.

Tabela 2 – Dimensões dos grãos

Ensaio	Materiais	
	Areia natural	Areia reciclada
Dim. Máx. característica (mm)	4,75	4,75
Módulo de Finura (%)	2,20	3,09

Fonte: O autor, 2024.

Gráfico 1 – Ensaio granulométrico dos agregados



Fonte: O autor, 2024.

Absorção de água

Após a etapa de beneficiamento, os agregados foram submetidos ao ensaio de absorção de água, conforme ilustrado na Figura 5. Esses ensaios são essenciais para avaliar o comportamento dos agregados reciclados dentro da matriz cimentícia, especialmente no que se refere à demanda de água da mistura. A obtenção de dados precisos sobre a absorção de água permite ajustar a dosagem de água no concreto, assegurando a coesão e a trabalhabilidade adequadas da mistura (COSTA, 2021).

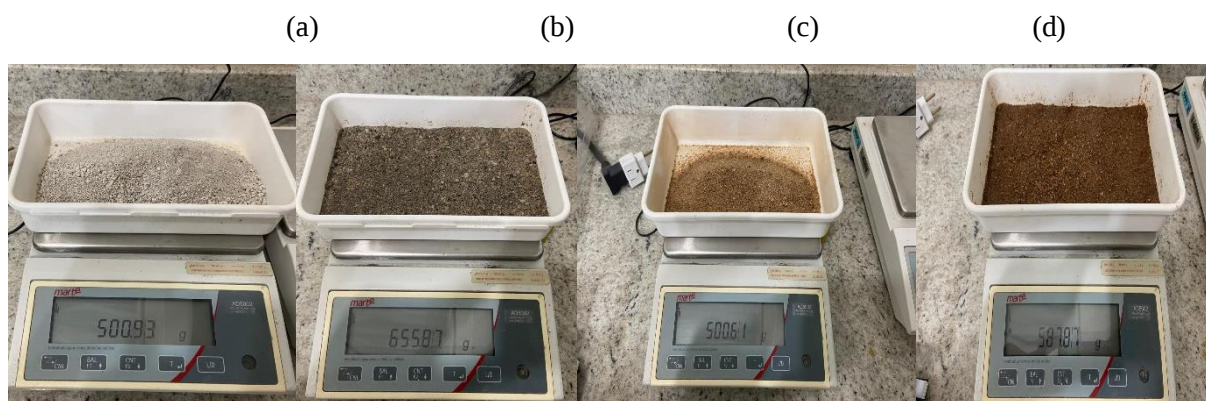


Figura 5 – (a) Areia reciclada seca; (b) Areia reciclada húmida; (c) Areia natural seca; (d) Areia natural úmida. Fonte: O autor, 2024.

No ensaio realizado, os valores de umidade encontrados foram de 30,98% para o agregado reciclado e 17,57% para o agregado natural. Esses resultados indicam uma maior capacidade de absorção de água por parte do agregado reciclado em comparação ao natural.

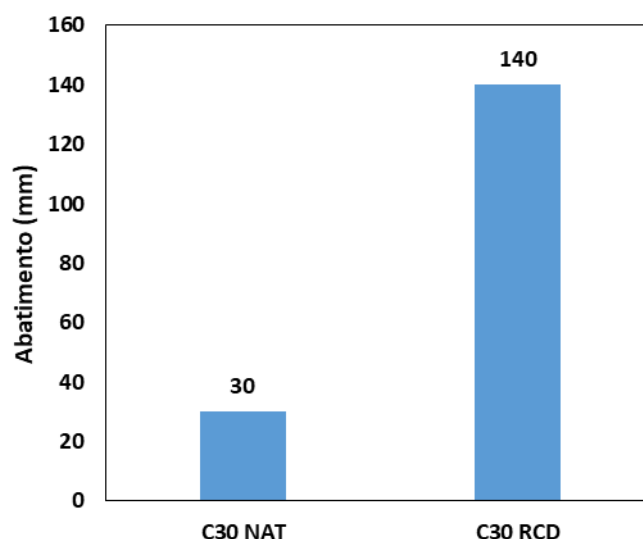
Consequentemente, será necessário ajustar a quantidade de água na mistura para compensar essa diferença e garantir a trabalhabilidade adequada do concreto. Esse aumento na absorção deve ser levado em consideração para evitar possíveis impactos na resistência e na durabilidade do material final.

Caracterização dos concretos produzidos

Abatimento do tronco de cone

O Gráfico 2 apresenta os resultados obtidos de cada concreto para o abatimento do tronco de cone e a Figura 6 apresenta o ensaio.

Gráfico 2 – Abatimento do tronco de cone



Fonte: O autor, 2024.

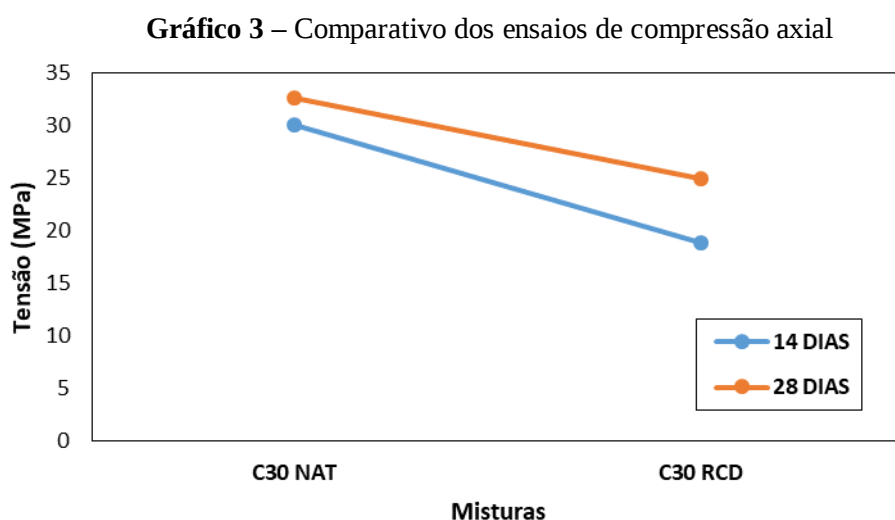


Figura 6 - Teste de abatimento de tronco de cone. Fonte: O autor, 2024.

A partir dos resultados obtidos, foi possível observar que para o concreto com agregado reciclado o abatimento foi de (140) mm, para o concreto com agregado natural o abatimento foi de (30) mm. Devido ao resíduo reciclado de concreto ser um agregado mais poroso do que a areia natural, houve uma diferença de abatimento 4,6 vezes maior para o concreto com agregado reciclado diante o aumento da porosidade na mistura do material que estar diretamente ligado ao aumento de água necessário.

Resistência à compressão axial

O Gráfico 3 apresenta os resultados obtidos.



Fonte: O autor, 2024.

Aos 14 dias de cura, os corpos de prova apresentaram uma resistência à compressão média de 31,7 MPa para o concreto com agregado natural (NAT), e 18,9 MPa para a mistura com 15% de substituição do agregado natural pelo reciclado (C30).

Os resultados indicam que a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado leva a uma redução significativa na resistência à compressão, com uma diferença de 37,2% em comparação ao concreto com agregado natural. Este declínio pode ser explicado pelo aumento da porosidade resultante da inclusão do AMR, que facilita uma maior absorção de água e consequentemente diminui a resistência mecânica do concreto.

Segundo pesquisadores como Costa (2021) e Dutra (2021), esta condição eleva a demanda de água para obter a trabalhabilidade e consistência desejada, aumentando o fator água/cimento afetando negativamente a resistência. Portanto, é crucial manter um equilíbrio

cuidadoso na relação água/cimento para assegurar adequada trabalhabilidade, sem sacrificar a resistência estrutural do material.

Aos 28 dias de cura, os concretos apresentaram resistências média de 33 MPa para o NAT e 25 MPa para o reciclado C30. Esses valores correspondem a aumentos de 0,41% para a mistura natural e 32,3% para a mistura com 15% de substituição em relação aos 14 dias.

Os resultados demonstram que a substituição parcial do agregado natural por agregado miúdo reciclado, afeta significativamente a resistência à compressão do concreto. De acordo com Costa (2021), devido ao grande índice de absorção de água que o material utilizado tem, e com o aumento de água na mistura, haverá uma perda significativa de resistência a compressão axial.

Esses resultados evidenciam que, embora a resistência inicial do concreto com areia reciclada seja inferior, a performance do material melhora com o tempo de cura, sugerindo que o uso de areia reciclada pode ser uma alternativa eficaz e sustentável. A melhoria contínua na resistência do concreto reciclado ao longo do tempo destaca a importância de considerar o tempo de cura ao avaliar a viabilidade do uso de materiais reciclados na construção.

CONCLUSÃO

Este estudo demonstra que a incorporação de 15% de agregado reciclado no concreto, especificamente agregado miúdo, afeta a resistência à compressão, mas mantém as propriedades físico-mecânicas dentro de limites aceitáveis para aplicações estruturais. Aos 14 dias de cura, o concreto com 15% de substituição apresentou uma resistência média de 18,9 MPa, 32,3% inferior ao concreto com agregado natural (25 MPa). No entanto, aos 28 dias, a resistência do concreto com agregado reciclado aumentou para 26 MPa, reduzindo a diferença para 21,2% em relação ao concreto com agregado natural, que alcançou 33 MPa. Essa recuperação progressiva das propriedades mecânicas ao longo do tempo sugere que o uso de agregado reciclado pode ser uma alternativa sustentável viável, desde que se leve em consideração o tempo de cura.

Para trabalhos futuros, é recomendada a exploração de diferentes tipos de agregados reciclados e a investigação de aditivos e técnicas de cura para potencializar as propriedades mecânicas. Além disso, estudos de ciclo de vida e análises de desempenho em condições extremas devem ser realizados para validar a aplicabilidade do concreto reciclado em diferentes contextos construtivos.

Para futuros estudos, recomenda-se também uma investigação mais aprofundada sobre o impacto de diferentes proporções e tipos de agregados reciclados na resistência e durabilidade do concreto, explorando também a combinação com aditivos que possam melhorar suas propriedades. Além disso, é essencial conduzir estudos de durabilidade em longo prazo e em diferentes ambientes, incluindo condições extremas, para validar o comportamento do concreto reciclado. Pesquisas de ciclo de vida também são fundamentais para quantificar os benefícios ambientais e econômicos dessa prática, reforçando a viabilidade técnica e sustentável do uso de materiais reciclados na construção civil.

Adicionalmente, a análise da microestrutura do concreto com agregado reciclado pode fornecer insights sobre os mecanismos que contribuem para a recuperação de resistência ao longo do tempo, permitindo a identificação de possíveis melhorias nos processos de produção. O desenvolvimento de modelos que integrem variáveis como tipo de agregado, tempo de cura e condições ambientais também seria valioso para orientar o uso eficiente desses materiais. Além disso, a implementação de estudos comparativos em larga escala, envolvendo diferentes regiões e condições climáticas, pode ajudar a consolidar as práticas mais eficazes e economicamente viáveis para o uso de agregados reciclados em diversos contextos.

REFERÊNCIAS

ALTHEMAN, D. Avaliação da durabilidade de concretos confeccionados com entulho de construção civil. In. CONGRESSO INTERNO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNICAMP, X, Universidade de Campinas, Campinas, 2002. **Anais [...]**. Campinas: UNICAMP, 2002.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico dos concretos**. São Paulo, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

COSTA, Maíra. **Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos produzidos com agregados miúdos reciclados e metacaulim dosados pelo modelo de empacotamento compressível**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.

DE LARRARD, F., FERRARIS, C.F., SEDRAN, T., “Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material”, **Materials and Structures**, 31, n. 7, pp. 494-498. 1999.

DUTRA, Juliano. **Comportamento mecânico e durabilidade de concretos de resistência normal e de alta resistência contendo agregados de resíduos de concreto e metacaulim**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.

KISKU, N.; JOSHI, H.; ANSARI, M. *et al.* A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. **Construction and Building Material**, v. 131, pp. 721-740, 2017.

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

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho de construção civil para utilização como agregado de argamassas e concretos**. São Paulo, 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

NOGUCHI, Takafumi; PARK, Won-Jun; KITAGAKI, Ryoma. Risk evaluation for recycled aggregate according to deleterious impurity content considering deconstruction scenarios and production methods. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 104, p. 405-416, 2015.

PINTO, T. de P. **Utilização de resíduos de construção: estudo do uso em argamassas**. São Carlos, 1986. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1986.