

SUBMETIDO 25/04/2023

APROVADO 29/06/2023

PUBLICADO ON-LINE 02/08/2023

VERSÃO FINAL DIAGRAMADA 03/01/2025

EDITORA ASSOCIADA

Profa. Dra. Nelma Mirian Chagas de Araújo

 Jocimar Souza
Küster Junior ^[1]

 Fernanda Giannotti
da Silva Ferreira ^[2] *

 Fernando Menezes
de Almeida Filho ^[3]

[1] juniorkuster@gmail.com
Universidade Federal de São
Carlos (UFSCar), São Carlos,
São Paulo, Brasil

[2] fgiannotti@ufscar.br

[3] almeidafilho@ufscar.br
Departamento de Engenharia
Civil, Universidade Federal de
São Carlos (UFSCar), São Carlos,
São Paulo, Brasil

* Autor para correspondência.

Influência dos agregados reciclados miúdo e graúdo nas propriedades mecânicas do concreto autoadensável

RESUMO: O concreto autoadensável possui características específicas que o diferenciam do concreto convencional. Destacam-se a sua capacidade de autoadensamento, facilidade de bombeamento, excelente homogeneidade e resistência à segregação, características próprias de sua composição. Para a produção desse concreto, a reciclagem dos resíduos da construção civil vem despertando grande interesse e se consolidando como uma prática importante para a sustentabilidade do setor construtivo, pela redução do impacto ambiental gerado. Assim, o presente estudo buscou avaliar a influência da substituição dos agregados naturais por reciclados na produção de concreto autoadensável. Foram realizados ensaios dos concretos no estado fresco para verificação de sua autoadensabilidade. No estado endurecido, foram realizados ensaios para determinação da resistência à compressão simples, módulo de elasticidade, absorção de água, índice de vazios e massa específica. Os concretos produzidos apresentaram desempenho satisfatório no estado fresco, sendo considerados autoadensáveis. Quanto ao comportamento mecânico, os concretos apresentaram resistência à compressão similar ou superior à do concreto de referência. Ocorreu redução no módulo de elasticidade à medida que se elevou o teor de incorporação dos agregados reciclados. Já os valores de absorção de água e índice de vazios cresceram à medida que se elevou o teor de incorporação dos agregados reciclados.

Palavras-chave: agregado reciclado; concreto autoadensável; construção civil; propriedades mecânicas; sustentabilidade.

Influence of fine and coarse recycled aggregates on the mechanical properties of self-compacting concrete

ABSTRACT: Self-compacting concrete has specific characteristics that make it different from the conventional one, with emphasis on its self-compacting ability, pumping efficiency, excellent homogeneity, and resistance to segregation, which are characteristic of its composition. The recycling of construction waste

to produce self-compacting concrete has stirred up great interest and consolidated as an important sustainability practice in construction sector due to its reduced environmental impact. This study aimed to evaluate the influence of replacing natural aggregates with recycled ones in the production of self-compacting concrete. Self-compacting ability of the two types of concrete was tested in the fresh state, while their compression resistance, elasticity modulus, water absorption capacity, void index and specific mass were tested in the hardened state. Both concrete types showed satisfactory performance in the fresh state, thus being considered self-compacting. Regarding mechanical behavior, the concretes presented similar or higher resistance to compression compared to the reference. The results also showed that the higher the recycled content, the lower the elasticity modulus and the higher the water absorption and void index.

Keywords: *building construction; mechanical properties; recycled aggregate; self-compacting concrete; sustainability.*

1 Introdução

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados no mundo, principalmente devido às suas características favoráveis aos fins esperados, como durabilidade, versatilidade, resistência à compressão satisfatória, custo-benefício e disponibilidade de matérias-primas. No entanto, o uso de concreto tem sido questionado por não ser uma alternativa ambientalmente correta, destacando-se pelo esgotamento das reservas naturais dos insumos e pelo desperdício de materiais, além de problemas de disposição dos resíduos gerados (Yang; Du; Bao, 2011).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a melhor forma de reduzir o impacto ambiental causado pela indústria da construção civil, e nesse caso específico pela indústria do concreto, seria a redução do seu consumo. Como há, porém, uma tendência de aumento desse consumo, devem-se adotar medidas visando-se ao desenvolvimento industrial sustentável do material. Uma alternativa para o controle e a redução de tal impacto é o reaproveitamento e reciclagem desses resíduos, o que propiciará a diminuição de áreas de depósitos de resíduos e, também, reduzirá a extração de recursos naturais para a fabricação de materiais para a construção civil.

Segundo Pinto (1999), nas atividades de construção, reparos e demolição, muitas vezes por deficiência no processo construtivo, são gerados resíduos, considerados subprodutos desse processo. Os custos dessa prática refletem no aumento do custo final da construção, remoção e tratamento desse material residual, situação que se agrava ainda mais quando este é disposto clandestinamente em locais impróprios, como terrenos baldios, margens de rios e córregos, gerando problemas como enchentes, poluição visual, proliferação de vetores de doenças e substâncias tóxicas.

De acordo com a International Solid Waste Association (ISWA, 2022), estima-se que, no cenário vigente de produção de bens de consumo, a geração de resíduos sólidos urbanos aumentará em todo o mundo, passando de 2 bilhões de toneladas/ano, montante produzido em 2016, para 3,4 bilhões de toneladas, em 2050 – cumpre acrescentar que a maior parte desse aumento será observada em países de baixa renda, onde a geração deve triplicar.

A geração de resíduos de construção é prevista geralmente por meio de indicadores socioeconômicos. Estudos realizados estimaram em 230 a 760 kg/hab.ano a produção de resíduos da construção, o que pode representar entre 40% e 70% do resíduo sólido municipal (Pinto, 1999). De acordo com a Pesquisa Setorial da Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON) (Angulo; Oliveira; Machado, 2022), levantamentos realizados em diferentes municípios brasileiros indicam que a geração de resíduos de construção per capita varia de 168 a 760 kg/hab.ano, o que resulta em uma mediana próxima a 500 kg/hab.ano para os municípios brasileiros.

A reciclagem de resíduos da construção e demolição, na forma de agregados, vem sendo considerada uma alternativa para diminuição dos impactos ambientais ocasionados pela indústria da construção civil (Campos *et al.*, 2018). No entanto, como os agregados reciclados são diferentes dos agregados naturais, o concreto com agregado reciclado e o concreto com agregado natural também diferem em suas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade (Bravo *et al.*, 2018). Além disso, é necessário transpor alguns obstáculos quando se planeja utilizar este tipo de agregado – o reciclado – devido à sua heterogeneidade e variabilidade de composição, aspecto que vai exigir aprofundamento em pesquisas sobre a sua utilização, tendo em vista o importante papel que os agregados desempenham no comportamento dos concretos (Campos *et al.*, 2018).

A utilização de agregados reciclados a partir de resíduos de construção e demolição em concretos estruturais já é uma realidade em muitos países – Alemanha, Portugal, Reino Unido e, desde 2021, com a publicação da NBR 15116 (ABNT, 2021b), também é permitida a utilização desses materiais no Brasil, sendo estabelecidos os métodos de ensaios para verificação dos requisitos para os agregados reciclados a serem incorporados em argamassas e concretos de cimento Portland. De acordo com a norma, quando o agregado reciclado for utilizado em compósitos ou produtos com função estrutural, é indicado utilizar o agregado reciclado de concreto, sendo a substituição de agregado natural por agregado reciclado limitada a 20% da massa de agregados totais e a concretos das classes de agressividade I e II da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Desse modo, dada a grande heterogeneidade e variabilidade na composição dos agregados reciclados, o presente estudo visa analisar o comportamento de concretos autoadensáveis com substituição parcial dos agregados graúdo e miúdo por agregados reciclados e realizar um comparativo com as propriedades físicas e mecânicas do concreto de referência (com agregados naturais).

Assim, no restante do texto são apresentados os procedimentos experimentais realizados, com a descrição dos materiais utilizados na dosagem de cada concreto analisado, bem como as características dos materiais constituintes, na seção 2. Na seção 3, são apresentados os resultados obtidos e a discussão das propriedades dos concretos nos estados fresco e endurecido. Por fim, na seção 4, são apresentadas as conclusões deste trabalho.

2 Procedimento experimental

Para a produção dos concretos, foram utilizados os seguintes materiais: CP V ARI RS, filer calcário, aditivo superplastificante à base de policarboxilatos com nanosilica estabilizada, agregado miúdo (natural e reciclado) e agregado graúdo (natural e reciclado).

As amostras de agregados reciclados foram coletadas em uma usina de reciclagem na cidade de Americana, estado de São Paulo (SP), em função da disponibilidade

dos materiais e facilidade em sua obtenção. Foram coletados os agregados miúdo e graúdo, provenientes da reciclagem de concretos e argamassas, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 ►

Lote para coleta dos agregados graúdos reciclados. (a) Pilha de agregados reciclados. (b) Detalhe do material.
Fonte: arquivo dos autores



Tabela 1 ▼

Caracterização dos agregados miúdos.
Fonte: dados da pesquisa

Os ensaios de caracterização dos agregados foram executados de acordo com as normas técnicas: distribuição granulométrica – NBR 17054 (ABNT, 2022b); massa unitária e volume de vazios – NBR 16972 (ABNT, 2021e); teor de materiais pulverulentos – NBR 16973 (ABNT, 2021f); e densidade e absorção de água do agregado miúdo – NBR 16916 (ABNT, 2021c) – e do agregado graúdo – NBR 16917 (ABNT, 2021d). As características do agregado miúdo estão apresentadas na Tabela 1. Os agregados miúdos foram classificados em função do módulo de finura (MF).

Material	Módulo de finura	Dimensão máxima característica (mm)	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária no estado solto (kg/m ³)	Absorção de água (%)
MF 1,07 (natural)	1,07	0,6	2,67	1.490	0,21
MF 2,47 (natural)	2,47	2,4	2,61	1.380	1,20
MF 2,86 (reciclada)	2,86	4,8	2,49	1.330	9,81

A Figura 2 apresenta as curvas granulométricas dos agregados miúdos.

Figura 2 ►

Composição granulométrica dos agregados miúdos.
Fonte: dados da pesquisa

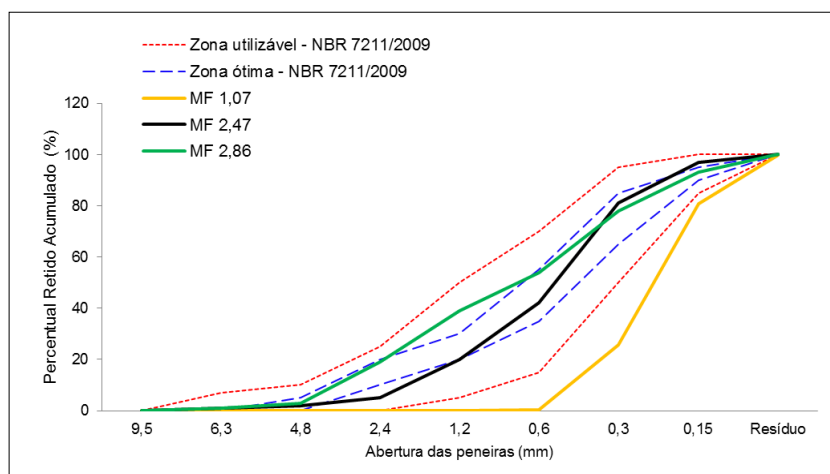


Tabela 2 ▼

Caracterização dos agregados graúdos.

Fonte: dados da pesquisa

Somente a areia MF 1,07 se encontra fora da zona utilizável, de acordo com os parâmetros da NBR 7211 (ABNT, 2022a). O agregado foi, contudo, incorporado à mistura, já que o intuito foi obter um esqueleto granular com a menor quantidade de vazios e maior massa unitária, resultado que foi possível a partir do preenchimento desses espaços por agregados finos.

As características do agregado graúdo são apresentadas na Tabela 2, sendo AGN – agregado graúdo natural e AGR – agregado graúdo reciclado.

Material	Módulo de finura	Dimensão máxima característica (mm)	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária no estado solto (kg/m ³)	Absorção de água (%)
AGN D _{máx} 9,5 mm	5,42	9,5	2,70	1.410	0,74
AGR D _{máx} 9,5 mm	5,18	9,5	2,45	1.250	4,58

Os agregados graúdos foram classificados em função da dimensão máxima (D_{máx}) característica.

2.1 Dosagem dos concretos

Para o desenvolvimento dos traços, adotou-se a metodologia de dosagem proposta por Alencar e Helene (2008). A partir da determinação do concreto autoadensável (CAA) de referência, efetuou-se a substituição parcial dos agregados naturais por reciclados (graúdo e miúdo). Nessa etapa, foi realizada a compensação do volume em função da massa específica dos materiais bem como o acréscimo de água na mistura para compensar a maior absorção de água dos agregados reciclados, de acordo com os resultados de absorção de água apresentados nas Tabelas 1 e 2 anteriormente apresentadas. Para os concretos com agregados reciclados, foi necessário realizar a pré-saturação dos agregados por 15 minutos em 70% da água de amassamento antes do início da mistura.

A perda de fluidez ocasionada pela incorporação dos agregados reciclados nos concretos foi corrigida com o acréscimo de aditivo superplastificante nas misturas (em torno de 2% em relação à massa de cimento), cujo parâmetro para ajuste foi a obtenção do espalhamento no intervalo da classe de espalhamento SF2 (660 mm a 750 mm).

A Tabela 3 apresenta a composição e parâmetros dos concretos autoadensáveis desenvolvidos, sendo:

- AN REF – concreto produzido com 100% de agregados naturais;
- AGR 30 – concreto produzido com 30% de agregado graúdo reciclado, 70% de agregado graúdo natural e 100% de agregado miúdo natural;
- AGR 50 – concreto produzido com 50% de agregado graúdo reciclado, 50% de agregado graúdo natural e 100% de agregado miúdo natural;
- AGR100 – concreto produzido com 100% de agregado graúdo reciclado e 100% de agregado miúdo natural;

Tabela 3 ▼
Composição e parâmetros
das misturas estudadas.
Fonte: dados da pesquisa

- AMR 30 – concreto produzido com 30% de agregado miúdo reciclado, 70% de agregado miúdo natural e 100% de agregado graúdo natural;
- AMR 50 – concreto produzido com 50% de agregado miúdo reciclado, 50% de agregado miúdo natural e 100% de agregado graúdo natural.

Material	AN REF	AGR 30	AGR 50	AGR 100	AMR 30	AMR 50
Cimento (kg/m ³)	421,0	421,0	421,0	421,0	421,0	421,0
Fíler calcário (kg/m ³)	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0
AMN MF 1,07 (kg/m ³)	441,0	441,0	441,0	441,0	441,0	441,0
AMN MF 2,47 (kg/m ³)	441,0	441,0	441,0	441,0	176,4	–
AMR MF 2,86 (kg/m ³)	–	–	–	–	252,4	441
AGN MF 5,42 (kg/m ³)	738,0	516,6	369,0	–	738,0	738,0
AGR MF 5,18 (kg/m ³)	–	200,9	334,8	669,7	–	–
Água amassamento (kg/m ³)	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0
Água devido à absorção (kg/m ³)	–	9,2	15,3	33,7	12,4	20,6
Aditivo (kg/m ³)	8,0	8,4	8,4	9,3	9,3	10,1
A/C amassamento	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
A/C amassamento + absorção	0,50	0,52	0,54	0,57	0,56	0,60
FC/C (%)	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
FC/AM (%)	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
SP/C (%)	1,9	2,0	2,0	2,2	2,2	2,4
Teor de argamassa (%)	64,9	65,5	66,0	67,1	64,8	64,7

Nota: AMN: agregado miúdo natural; AMR: agregado miúdo reciclado; AGN: agregado graúdo natural; AGR: agregado graúdo reciclado

Os corpos de prova foram moldados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015). Após 24 horas, foram desmoldados e mantidos em cura submersa em água saturada com cal até as idades dos respectivos ensaios.

2.2 Ensaios realizados nos estados fresco e endurecido

No estado fresco, foram realizados ensaios para determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual; determinação da habilidade passante pelo método do anel J e da caixa L; determinação da viscosidade pelo método do Funil V; e determinação da resistência à segregação pelo método da coluna de segregação. Todos seguindo o que dispõem as respectivas normas técnicas.

Quadro 1 ▼

Classificação do CAA
no estado fresco.

Fonte: NBR 15823-1 (ABNT, 2017a)

Após a realização dos ensaios no concreto fresco, as misturas foram classificadas de acordo com o desempenho apresentado, mediante os parâmetros definidos pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), conforme apresentado no Quadro 1.

Ensaio	Classes		Método de ensaio
Espalhamento (mm)	SF 1	550 a 650	NBR 15823-2 (ABNT, 2017b)
	SF 2	660 a 750	
	SF 3	760 a 850	
t_{500} (s)	VS 1	≤ 2	
	VS 2	> 2	
Índice de estabilidade visual	IEV 0	Sem evidência de segregação ou exsudação	
	IEV 1	Sem evidência de segregação e com leve exsudação	
	IEV 2	Presença de pequena auréola de argamassa (≤ 10 mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto	
	IEV 3	Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades (auréola de argamassa > 10 mm)	
Anel J (mm)	PJ 1	0 a 25 com 16 barras de aço	NBR 15823-3 (ABNT, 2017c)
	PJ 2	25 a 50 com 16 barras de aço	
Caixa L (H2/H1)	PL 1	$\geq 0,80$ com duas barras de aço	NBR 15823-4 (ABNT, 2017d)
	PL 2	$\geq 0,80$ com três barras de aço	
Funil V (s)	VF 1	< 9	NBR 15823-5 (ABNT, 2017e)
	VF 2	9 a 25	
Coluna de segregação (%)	SR 1	≤ 20	NBR 15823-6 (ABNT, 2017f)
	SR 2	≤ 15	

No estado endurecido, foram realizados o ensaio de resistência à compressão simples em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm $\times$ 200 mm aos 3, 7 e 28 dias, segundo a norma NBR 5739 (ABNT, 2018), e o ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias, segundo a NBR 8522 (ABNT, 2021a). Foram rompidos 3 corpos de prova para cada idade e ensaio, sendo considerada a média dos resultados.

Também foram realizados os ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm $\times$ 200 mm, na idade de 28 dias, de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005).

3 Resultados e discussão

Os resultados obtidos bem como a análise e discussão são apresentados nas subseções a seguir. Na subseção 3.1 são apresentadas as propriedades dos concretos no estado fresco

(espalhamento, viscosidade plástica aparente t_{500} , índice de estabilidade visual, habilidade passante pelo anel J, habilidade passante pela caixa L, viscosidade plástica aparente pelo funil V e coluna de segregação). Nas subseções 3.2, 3.3 e 3.4, são apresentadas as propriedades dos concretos no estado endurecido: resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, respectivamente.

3.1 Propriedades dos concretos no estado fresco

Tabela 4 ▼

Avaliação das propriedades no estado fresco.

Fonte: dados da pesquisa

Os concretos foram submetidos a ensaios para avaliação das propriedades no estado fresco, conforme apresentado na Tabela 4. Na Figura 3, é apresentada parte dos ensaios realizados para caracterização e classificação do concreto de referência no estado fresco.

Traço	Espalhamento (mm)	t_{500} (s)	Índice de estabilidade visual	Anel J (mm)	Caixa L (H2/H1)	Funil V (s)	Coluna de segregação (%)
AN REF	720	1,91	IEV 0	0	0,94	3,88	10,96
AGR 30	740	1,14	IEV 0	20	0,94	3,40	11,82
AGR 50	745	1,05	IEV 0	15	0,97	3,59	9,12
AGR 100	730	1,31	IEV 0	45	0,80	4,41	9,21
AMR 30	750	1,09	IEV 0	5	1,00	3,47	1,60
AMR 50	715	1,06	IEV 0	40	0,62	5,72	0,77

Figura 3 ►

Caracterização do CAA no estado fresco.

(a) Espalhamento.

(b) Anel J. (c) Funil V.

(d) Coluna de segregação.

Fonte: arquivo dos autores

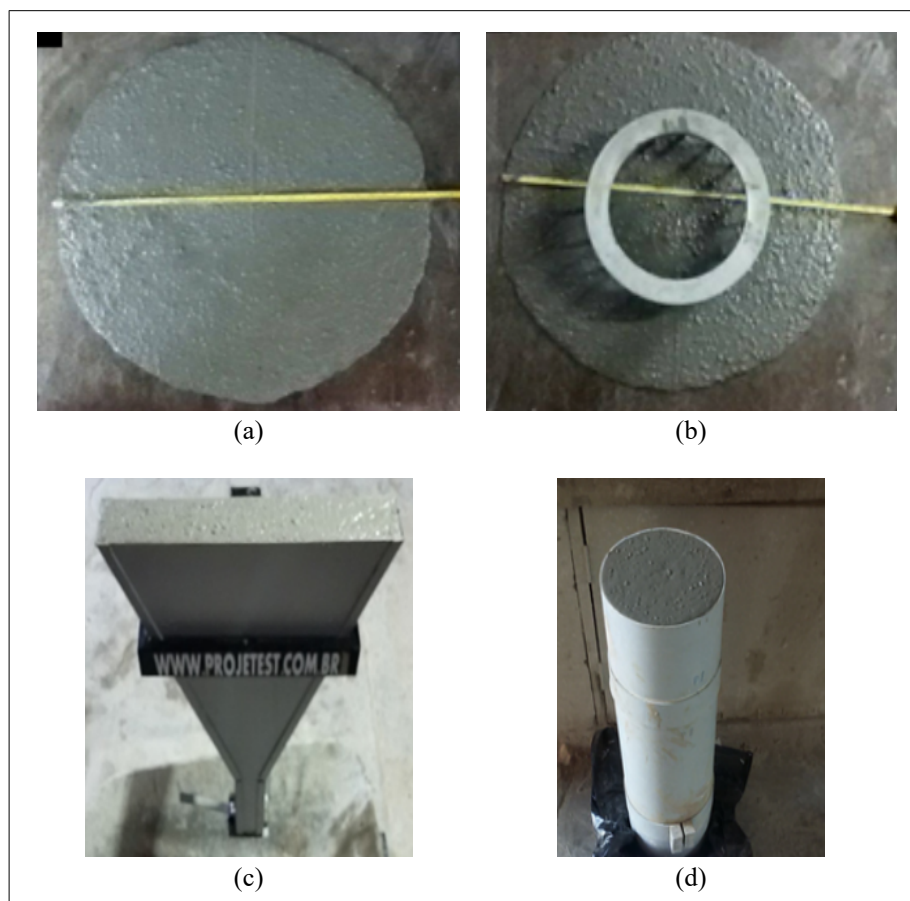


Figura 4 ▼

Estabilidade visual dos concretos. (a) AN REF.

(b) AGR 30. (c) AGR 50.

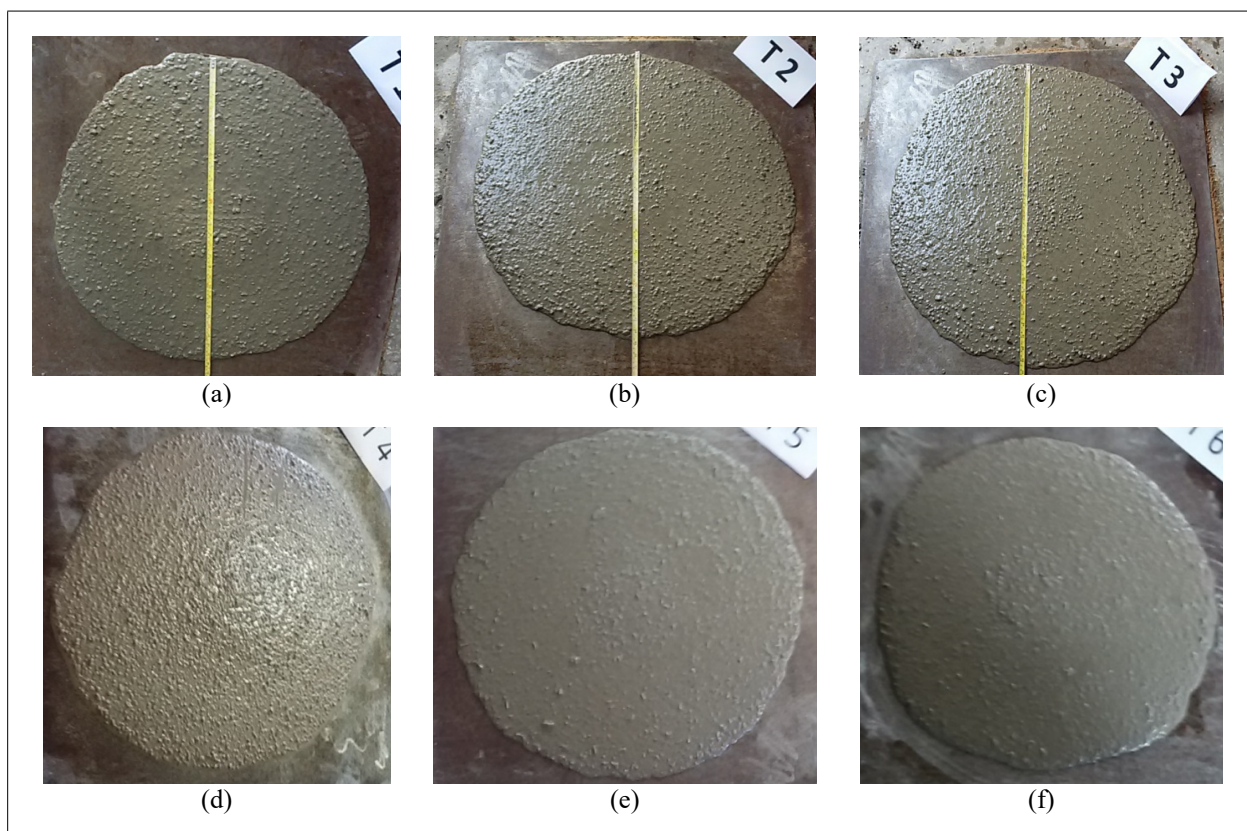
(d) AGR 100. (e) AMR 30.

(f) AMR 50.

Fonte: arquivo dos autores

O traço AMR 50 não atingiu o valor mínimo de 0,80 para o ensaio da caixa L, mas obteve resultados satisfatórios nos demais parâmetros. Ressalta-se que o resultado obtido no ensaio da caixa L (AMR 50) foi para o equipamento com três barras, embora, em função do resultado do ensaio do anel J, se devesse ter utilizado um equipamento com duas barras, o que não foi possível por sua indisponibilidade na ocasião do ensaio.

O índice de estabilidade visual foi determinado visualmente pela análise do concreto, imediatamente após o término de seu espalhamento, conforme a NBR 15823-2 (ABNT, 2017b). Para essa análise, observou-se a distribuição dos agregados graúdos na mistura, a distribuição da argamassa ao longo do perímetro e a ocorrência de exsudação, conforme apresentado na Figura 4.



Todos os traços foram enquadrados na classe IEV 0, pois não houve evidência de segregação ou exsudação.

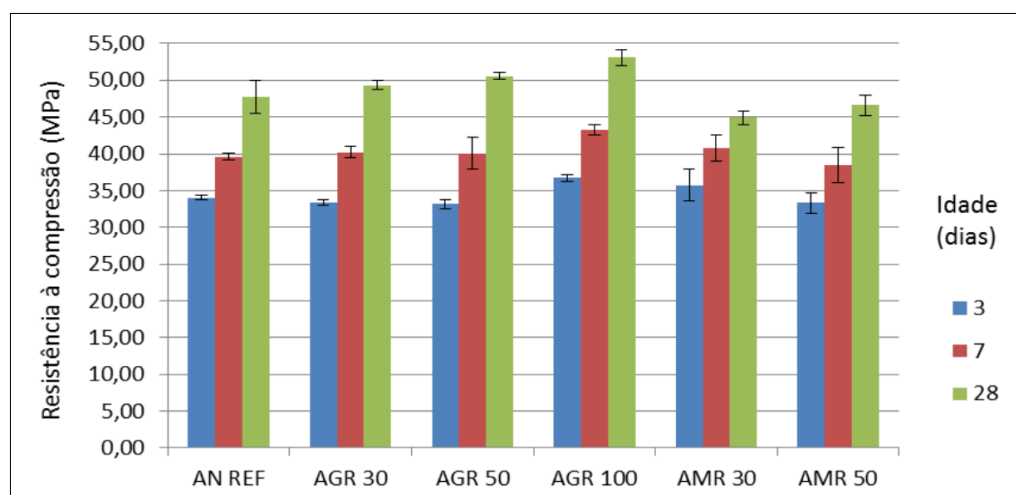
3.2 Resistência à compressão simples

Os resultados do ensaio de resistência à compressão dos concretos aos 3, 7 e 28 dias bem como o desvio padrão são apresentados na Figura 5 (próxima página).

Figura 5 ►

Evolução da resistência à compressão dos concretos.

Fonte: dados da pesquisa



Os concretos AGR 30, AGR 50 e AGR 100 apresentaram valores médios de resistência à compressão aos 28 dias superiores ao do concreto AN REF, na ordem de 3,4% (AGR 30), 5,9% (AGR 50) e 11,2% (AGR 100). Já os concretos AMR 30 e AMR 50 apresentaram resultados inferiores ao do concreto de referência (AN REF). Para esses traços, houve uma redução da resistência de 6,0% e 2,4%, respectivamente.

De acordo com Tang *et al.* (2016), existem várias razões que podem possibilitar o aumento da resistência à compressão; entre elas, destaca-se que o agregado reciclado possui maior rugosidade superficial, possibilitando melhor aderência com a pasta de cimento, e que o elevado teor de absorção de água pode reduzir a relação água/cimento (a/c) na matriz cimentícia, elevando a resistência de aderência entre os agregados e a pasta, razões que justificam o comportamento dos concretos estudados.

Modani e Mohitkar (2015) observaram que traços contendo agregado reciclado obtiveram resistências iniciais elevadas em função da presença de cimento parcialmente hidratado aderido ao agregado, o que potencializa o processo de hidratação.

De acordo com Hani *et al.* (2018), esses resultados também podem ser explicados devido ao uso do aditivo superplastificante modificado com nanosílica, já que esta última pode preencher os vazios melhorando a microestrutura da pasta de cimento, tornando-a mais densa (efeito filer). Além disso, a reação pozolânica de nanopartículas com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ livre, produzida durante a hidratação do cimento, forma mais gel de C-S-H, resultando na melhora das propriedades mecânicas.

Na pesquisa de Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014), verificou-se que a maior resistência à compressão de concretos autoadensáveis foi alcançada para teores de substituição do agregado natural pelo reciclado de 25% e 40%, com a incorporação de cinza volante às misturas avaliadas.

Segundo Malta, Silva e Gonçalves (2013), as misturas com agregado miúdo reciclado apresentaram resistência à compressão inferior ao traço de referência, indicando que a água de compensação utilizada nas misturas pode não se manter no interior do agregado miúdo reciclado, deslocando-se para a matriz, aumentando a relação água/cimento e tornando-a mais porosa, o que consequentemente reduz a resistência à compressão.

A revisão de literatura realizada por Santos, Silva e Brito (2019) e Silva e Melo (2023) permite afirmar que o uso do agregado reciclado na produção de concretos, inclusive autoadensáveis, é viável. Ainda que as propriedades do agregado reciclado sejam inferiores às dos agregados naturais, principalmente pela presença de argamassa nos

agregados reciclados de concreto, o desempenho dos concretos dependerá do teor de substituição utilizado.

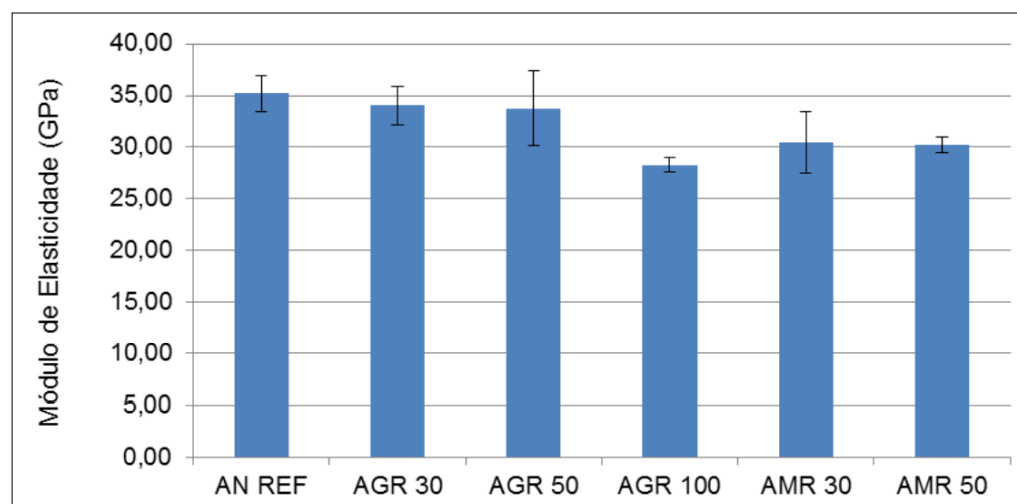
3.3 Módulo de elasticidade

Os resultados do ensaio de módulo de elasticidade para os concretos aos 28 dias bem como o desvio padrão (DP) são apresentados na Figura 6.

Figura 6 ►

Módulo de elasticidade dos concretos aos 28 dias.

Fonte: dados da pesquisa



Os traços com a incorporação de agregados reciclados apresentaram valores médios de módulo de elasticidade inferiores ao do concreto de referência, de forma decrescente – ou seja, quanto maior a porcentagem de substituição, menor o resultado do módulo de elasticidade. Pode-se observar que a incorporação dos agregados graúdos reciclados reduziu o módulo de elasticidade dos concretos em 3,3% (AGR 30), 4,0% (AGR 50) e 19,6% (AGR 100), e, para os agregados miúdos, em 13,5% (AMR 30) e 14,2% (AMR 50). Esse comportamento era esperado devido à maior porosidade e à menor rigidez do agregado reciclado.

Uma das principais características que afetam o módulo de elasticidade do concreto é a porosidade do agregado graúdo, pois, quanto maior a porosidade, menor é sua rigidez e capacidade de restringir a deformação da matriz. Outra característica importante é a massa específica, pois agregados densos geralmente possuem um alto módulo de elasticidade (Mehta; Monteiro, 2014).

Salesa *et al.* (2017) mostram que, apesar do aumento da resistência à compressão para o concreto com 100% de agregado reciclado, houve redução de 17,2% no resultado do ensaio de módulo de elasticidade, ocasionado provavelmente pela presença de argamassa aderida na superfície dos agregados reciclados, reduzindo a capacidade de deformabilidade do concreto.

Segundo Tejas e Pasla (2023), em concretos desenvolvidos com 100% de agregado graúdo reciclado, variando-se a relação água/cimento de 0,3 a 0,7, o módulo de elasticidade diminuiu com o aumento da relação água/cimento, como esperado, atingindo valores de, aproximadamente, 30 a 40 GPa.

De acordo com Santos, Silva e Brito (2017), a substituição dos agregados graúdos e miúdos naturais por reciclados promoveu a redução do módulo de elasticidade do

concreto, que diminuiu à medida que se aumentou o teor de incorporação do agregado miúdo reciclado, explicada por sua menor rigidez e maior deformabilidade.

3.4 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica para os concretos aos 28 dias são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 ►

Absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Fonte: dados da pesquisa

Concretos	Absorção de água (%)		Índice de vazios (%)		Massa específica (kg/m ³)	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
AN REF	3,02	0,12	6,82	0,26	2,330	0,01
AGR 30	3,66	0,25	8,16	0,51	2,310	0,01
AGR 50	4,56	0,24	10,05	0,50	2,304	0,01
AGR 100	6,61	0,12	14,20	0,25	2,291	0,00
AMR 30	6,02	0,15	12,95	0,14	2,276	0,01
AMR 50	6,95	0,08	14,70	0,13	2,263	0,01

Nota: DP: Desvio Padrão

Os traços com a incorporação de agregados reciclados apresentaram absorção de água superior à do concreto referência, de forma crescente, do que se conclui que, quanto maior o teor de substituição, maior a absorção de água. Pode-se observar que a incorporação dos agregados graúdos reciclados elevou a absorção de água dos concretos em 21% (AGR 30), 51% (AGR 50), 119% (AGR 100); para os agregados miúdos reciclados, em 100% (AMR 30) e 130% (AMR 50). Cabe ressaltar que, apesar do elevado crescimento da absorção de água para os concretos com agregados reciclados, todos os resultados obtidos são inferiores a 7% em massa. De acordo com Neville (2015), a maioria dos concretos de boa qualidade tem absorção de água menor do que 10%.

De forma semelhante, a pesquisa realizada por Malešev, Radonjanin e Marinković (2010) apresenta resultados de absorção de água crescentes à medida que se foi aumentando o teor de agregado reciclado na mistura, o que não impactou a resistência à compressão do concreto, uma vez que os traços com agregados reciclados atingiram valores de resistência à compressão superiores ao do concreto referência. Ressalta-se que a referida pesquisa trabalhou com concreto convencional.

Quanto ao índice de vazios, os traços com a incorporação de agregados reciclados apresentaram valores médios superiores ao do concreto referência, também de forma crescente. Pode-se observar que a incorporação dos agregados graúdos reciclados elevou o índice de vazios dos concretos, em comparação ao concreto referência, em 20% (AGR 30), 47% (AGR 50), 108% (AGR 100). Quando da incorporação dos agregados miúdos, esse índice aumentou em 90% (AMR 30) e 115% (AMR 50). Cabe ressaltar que, apesar do elevado crescimento do índice de vazios para os concretos com agregados reciclados, todos os resultados obtidos de índice de vazios são inferiores a 15%.

Resultados semelhantes foram encontrados por Moreira (2012), que estudou concretos autoadensáveis com agregados graúdos reciclados nos teores de 10%, 20% e 30% de substituição. O autor obteve resultado de índice de vazios para o teor de 30% de substituição superior ao do concreto referência em 23%, com resultado individual

de índice de vazios de até 16,1% –, mesmo assim, apresentou ganho de resistência à compressão, na idade de 28 dias, de 9,9% quando comparado com o concreto referência. Já a pesquisa realizada por Silva *et al.* (2016) apresenta resultados de índice de vazios de até 17,6% para o teor de substituição de 100% de agregados graúdos reciclados.

Os traços com a incorporação de agregados reciclados apresentaram valores médios de massa específica inferiores ao do concreto de referência, de forma decrescente – ou seja, quanto maior a porcentagem de substituição, menor foi o resultado de massa específica dos concretos. Esse comportamento já era esperado, pois o agregado reciclado possui menor massa específica que o agregado natural. Pode-se observar que a incorporação dos agregados graúdos reciclados reduziu a massa específica dos concretos em 0,8% (AGR 30), 1,1% (AGR 50), 1,6% (AGR 100), e para os agregados miúdos reciclados em 2,3% (AMR 30) e 2,9% (AMR 50), em comparação ao concreto de referência.

Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014) também verificaram que a absorção de água por imersão de concretos autoadensáveis aumenta com o teor de substituição do agregado natural pelo reciclado. Para o teor de incorporação de 60% do agregado reciclado, houve um aumento de 125% (*a/c* igual a 0,43), 136% (*a/c* igual a 0,48) e 118% (*a/c* igual a 0,53) em relação às misturas de referência. Isso é explicado pela maior capacidade de absorção de água do agregado reciclado em relação ao agregado natural. Como esperado, houve um aumento da absorção de água por imersão com o aumento da relação *a/c*.

4 Conclusões

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Os agregados reciclados comprometeram a fluidez e a trabalhabilidade dos concretos autoadensáveis estudados, mesmo com a compensação de água, devido à maior absorção deste componente dos agregados reciclados. A perda de fluidez e trabalhabilidade pode ser corrigida com o incremento de aditivo superplastificante nas misturas. Todos os concretos foram enquadrados na classe IEV 0, pois não houve evidência de segregação ou exsudação;
- Comparados com o concreto de referência, os concretos autoadensáveis com agregado graúdo reciclado AGR 30 e AGR 50 apresentaram ganho de resistência à compressão de 3,4% e 5,9%, respectivamente. Já os concretos AMR 30 e AMR 50 apresentaram redução da resistência à compressão em 6,0% e 2,4%, respectivamente. Quanto ao traço AGR 100, houve um aumento na resistência à compressão de 11,2%;
- O módulo de elasticidade decresceu à medida que se aumentou o teor de agregados reciclados na mistura. Ocorreu redução do módulo de elasticidade dos concretos com agregados graúdos reciclados em 3,3% (AGR 30), 4,0% (AGR 50) e 19,6% (AGR 100); para os concretos com agregados miúdos, em 13,5% (AMR 30) e 14,2% (AMR 50);
- Os traços com a incorporação de agregados reciclados apresentaram absorção de água e índice de vazios superiores aos valores do concreto referência, de forma crescente – quanto maior o teor de substituição, maior a absorção de água e o índice de vazios;

- O aumento na absorção de água observado nos concretos autoadensáveis produzidos com agregados reciclados está relacionado à maior capacidade de absorção de água desses agregados, em comparação com os agregados naturais. O aumento do índice de vazios observado nos concretos autoadensáveis produzidos com agregados reciclados é inerente à porosidade do concreto;
- Todos os traços produzidos com agregados reciclados apresentaram valores de massa específica inferiores ao do concreto referência. Isso se deve ao fato de o agregado reciclado possuir menor massa específica que o agregado natural. Além disso, foi realizada a compensação do volume deste agregado na mistura.

Destaca-se que a durabilidade dos concretos não foi avaliada, sendo interessante, na continuidade do estudo, avaliar a profundidade de carbonatação, a profundidade de penetração dos íons cloreto e o ataque por sulfatos, em concretos produzidos com agregado reciclado.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Nota

Este trabalho é decorrente da dissertação de Mestrado do autor Jocimar Souza Küster Junior, disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/10303>.

Contribuições ao artigo

KUSTER JUNIOR, J. S.: concepção ou desenho do estudo/pesquisa; análise e/ou interpretação dos dados. **FERREIRA, F. G. S.; ALMEIDA FILHO, F. M.:** concepção ou desenho do estudo/pesquisa; revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

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

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação – Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**: Concreto autoadensável – Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-3**: Concreto autoadensável – Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro, 2017c.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-4**: Concreto autoadensável – Parte 4: Determinação da habilidade passante – Métodos da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro, 2017d.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-5**: Concreto autoadensável – Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V. Rio de Janeiro, 2017e.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-6**: Concreto autoadensável – Parte 6: Determinação da resistência à segregação – Métodos da coluna de segregação e da peneira. Rio de Janeiro, 2017f.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e absorção de água. Rio de Janeiro, 2021c.

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: Agregados – Determinação de massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021e.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973**: Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021f.

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

ALENCAR, R.; HELENE, P. R. L. Diseño de la mezcla del hormigón autocompactante por el método brasileño. In: CONGRESO ESPAÑOL SOBRE HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE, 1., 2008, Valencia. **Comunicaciones** [...]. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2008. p. 257-266.

ANGULO, S. C.; OLIVEIRA, L. S.; MACHADO, L. (org.). **Pesquisa setorial ABRECON 2020**: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil. São Paulo: EPUSP, 2022. DOI: <https://doi.org/10.11606/9786589190103>.

BRAVO, M.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L.; PACHECO, J. Durability and shrinkage of concrete with CDW as recycled aggregates: Benefits from superplasticizer's incorporation and influence of CDW composition. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 818-830, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.176>.

CAMPOS, R. S.; BARBOSA, M. P.; PIMENTEL, L. L.; MACIEL, G. F. Influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável. **Revista Matéria**, v. 23, n. 1, e11964, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0300>.

HANI, N.; NAWAWY, O.; RAGAB, K. S.; KOHAIL, M. The effect of different water/binder ratio and nano-silica dosage on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 504-513, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.045>.

ISWA – INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION. **O futuro do setor de gestão de resíduos**: tendências, desafios e oportunidades para a década [2021 – 2030]. Rotterdam, 2022. Disponível em: <https://abrema.org.br/wp-content/uploads/2022/08/O-futuro-do-setor-de-gestao-de-residuos-ISWA-2022.pdf>. Acesso em: 3 abr. 2023.

MALEŠEV, M.; RADONJANIN, V.; MARINKOVIĆ, S. Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. **Sustainability**, v. 2, n. 5, p. 1204-1225, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3390/su2051204>.

MALTA, J. O.; SILVA, V. S.; GONÇALVES, J. P. Argamassa contendo agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição. **Gesta: Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 1, n. 2, p. 176-188, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.17565/gesta.v1i2.7214>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MODANI, P. O.; MOHITKAR, V. M. Recycled aggregate self compacting concrete: a sustainable concrete for structural use. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 4, n. 1, p. 116-120, 2015. Disponível em: <https://www.ijert.org/research/>

[recycled-aggregate-self-compacting-concrete-a-sustainable-concrete-for-structural-use-IJERTV4IS010200.pdf](#). Acesso em: 12 jul. 2023.

MOREIRA, K. M. V. **Concreto autoadensável com agregados graúdos reciclados de concreto**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/11382>. Acesso em: 5 fev. 2022.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. São Paulo: Pini, 2015.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

SALESA, A.; PÉREZ-BENEDICTO, J. A.; ESTEBAN, L. M.; VICENTE-VAS, R.; ORNA-CARMONA, M. Physico-mechanical properties of multi-recycled self-compacting concrete prepared with precast concrete rejects. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 364-373, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.087>.

SANTOS, S. A.; SILVA, P. R.; BRITO, J. Mechanical performance evaluation of self-compacting concrete with fine and coarse recycled aggregates from the precast industry. **Materials**, v. 10, n. 8, 904, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10080904>.

SANTOS, S. A.; SILVA, P. R.; BRITO, J. Self-compacting concrete with recycled aggregates – A literature review. **Journal of Building Engineering**, v. 22, p. 349-371, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.01.001>.

SILVA, D. A.; MELO, C. E. L. Agregado reciclado, uma fonte sustentável de matéria-prima: uma revisão. **Revista Principia**, v. 60, n. 2, p. 370-386, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6033>.

SILVA, Y. F.; ROBAYO, R. A.; MATTEY, P. E.; DELVASTO, S. Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 639-644, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.057>.

TANG, W. C.; RYAN, P. C.; CUI, H. Z.; LIAO, W. Properties of self-compacting concrete with recycled coarse aggregate. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2016, 276194, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/2761294>.

TEJAS, S.; PASLA, D. Assessment of mechanical and durability properties of composite cement-based recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 387, 131620, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131620>.

TUYAN, M.; MARDANI-AGHABAGLOU, A.; RAMYAR, R. Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. **Materials & Design**, v. 53, p. 983-991, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.100>.

YANG, J.; DU, Q.; BAO, Y. Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 1935-1945, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.063>.