

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

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), Brasil

^[2] fgiannotti@ufscar.br, ^[3] almeidafilho@ufscar.br. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Brasil

* autora correspondente

Resumo

O concreto autoadensável possui características específicas que o difere do concreto convencional. Destaca-se a sua capacidade de autoadensamento, facilidade de bombeamento, excelente homogeneidade e resistência à segregação, sendo estas características obtidas pela sua composição. Por outro lado, 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 no estado fresco para verificação da autoadensabilidade dos concretos. 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 ao 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 aumentou o teor de incorporação dos agregados reciclados.

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

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

Abstract

Self-compacting concrete has specific characteristics that differ from conventional concrete. Its self-compacting capability, ease of pumping, excellent homogeneity and resistance to segregation are highlighted, being these characteristics obtained by its composition. On the other hand, the recycling of waste from civil construction has aroused great interest and consolidated as an important practice for the sustainability of the construction sector, by reducing the environmental impact generated. Thus, the present study sought to evaluate the influence of the substitution of natural aggregates by recycled in the production of self-compacting concrete. Tests were carried out in the fresh state to verify the self-compacting of concretes. In the hardened state, tests were performed to determine the resistance to simple compression, modulus of elasticity, absorption of water voids index and specific mass. The concretes produced presented satisfactory performance in the fresh state, being considered self-compacting. As for the mechanical behavior, the concretes showed similar or higher compressive strength to the reference concrete. The modulus of elasticity decreased as the substitution content of the recycled aggregates increased. The results of water absorption and voids index increased as the substitution content of the recycled aggregates increased.

Keywords: recycled aggregate; self-compacting concrete; mechanical properties.

1. Introdução

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados no mundo, principalmente devido às suas características favoráveis, 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 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 da indústria do concreto, seria a redução do seu consumo. Porém, como há uma tendência de aumento desse consumo, devem-se adotar medidas visando ao desenvolvimento industrial sustentável do material. Uma alternativa para o controle e a redução deste impacto ambiental é o reaproveitamento e reciclagem desses resíduos, pois, com isso, ocorrerá à 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 os resíduos, considerados subprodutos dos processos. Os custos desta prática estarão no aumento do custo final da construção, remoção e tratamento destes resíduos, e se agravam mais quando esses materiais são dispostos 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 nos locais.

De acordo com 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, em 2016, para 3,4 bilhões de toneladas, em 2050, sendo 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 ABRECON 2020 (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). Ainda, é necessário transpor alguns obstáculos quando se planeja utilizar este tipo de agregado devido sua heterogeneidade e variabilidade de composição, além de 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, como Alemanha, Portugal, Reino Unido e, a partir de 2021, com a publicação da NBR 15116 (ABNT, 2021), 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 estudo em questão 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 física 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; os resultados obtidos e a discussão das propriedades dos concretos no estado fresco e endurecido são apresentados. Por fim, na seção 4; as conclusões deste trabalho.

2. Procedimento experimental

Para produção dos concretos foram utilizados os seguintes materiais: CP V ARI RS, fíler calcário, aditivo superplastificante à base de policarboxilatos com nanosílica 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 de obtenção dos mesmos. 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

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

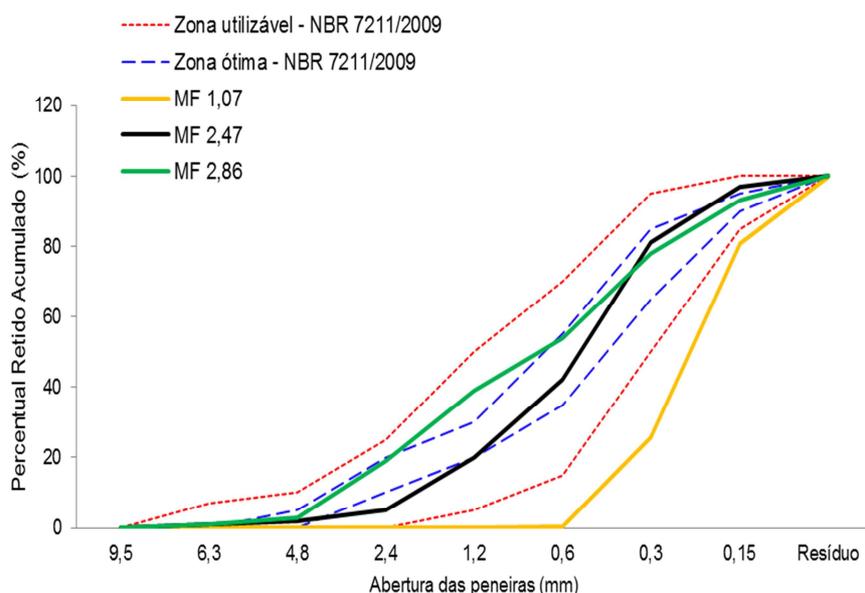
Tabela 1 – Caracterização dos agregados miúdos

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

Fonte: dados da pesquisa

A Figura 2 apresenta as curvas granulométricas dos agregados miúdos.

Figura 2 – Composição granulométrica dos agregados miúdos.



Fonte: dados da pesquisa

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

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

Tabela 2 – Caracterização dos agregados graúdos

Material	Módulo de finura	Dimensão máxima característica (mm)	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária estado solto (kg/m ³)	Absorção de água (%)
AGN D _{máx} 9,5mm	5,42	9,5	2,70	1.410	0,74
AGR D _{máx} 9,5mm	5,18	9,5	2,45	1.250	4,58

Fonte: dados da pesquisa

Os agregados graúdos foram denominados em função da dimensão máxima 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. 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 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;
- 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.

Tabela 3 – Composição e parâmetros das misturas estudadas

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 e AGR: Agregado graúdo reciclado

Fonte: dados da pesquisa

Os corpos de prova foram moldados de acordo com a ABNT NBR 5738:2015 (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 no estado fresco e endurecido

No estado fresco foi realizado o ensaio para determinação do espalhamento, 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 de acordo com as respectivas normas técnicas.

Após a realização dos ensaios no concreto fresco, as misturas foram classificadas de acordo com o desempenho apresentando mediante os parâmetros definidos pela norma ABNT NBR 15823-1:2017 (ABNT, 2017), conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação do CAA no estado fresco

Ensaio	Classes		Método de ensaio
Espalhamento (mm)	SF 1	550 a 650	NBR 15823-2:2017
	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 leve exsudação	
	IEV 2	Presença de pequena auréola de argamassa (≤ 10 mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do	
	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 15823-3:2017
	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 15823-4:2017
	PL 2	$\geq 0,80$ com três barras de aço	
Funil V (s)	VF 1	< 9	NBR 15823-5:2017
	VF 2	9 a 25	
Coluna de segregação (%)	SR 1	≤ 20	NBR 15823-6:2017
	SR 2	≤ 15	

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

No estado endurecido foi realizado 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 ABNT NBR 5739:2018 (ABNT, 2018) e o ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias, segundo a norma ABNT NBR 8522:2021 (ABNT, 2021). 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 ABNT NBR 9778:2005 (ABNT, 2005).

3. Resultados e discussão

Os resultados obtidos, bem como a análise e discussão, são apresentados nas subseções a seguir. Na seção 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

Os concretos foram submetidos aos ensaios para avaliação das propriedades no estado fresco, conforme apresentado na Tabela 5. Na Figura 3 é apresentada parte dos ensaios realizados para caracterização e classificação do concreto de referência no estado fresco.

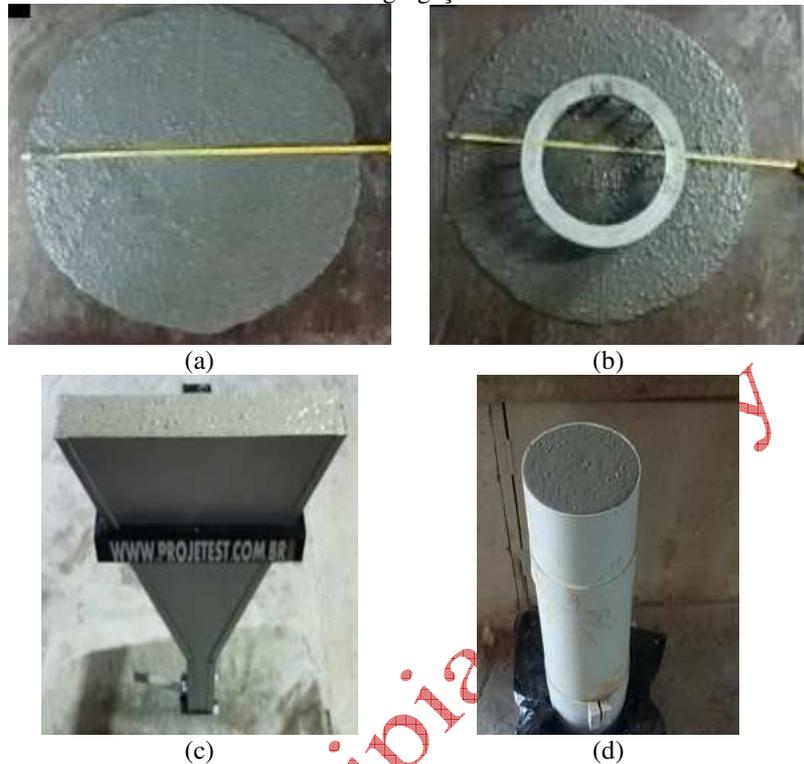
Tabela 5 – Avaliação das propriedades no estado fresco

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

Fonte: dados da pesquisa

Figura 3 – Caracterização do CAA no estado fresco. (a) Espalhamento. (b) Anel J. (c) Funil V. (d) Coluna de segregação



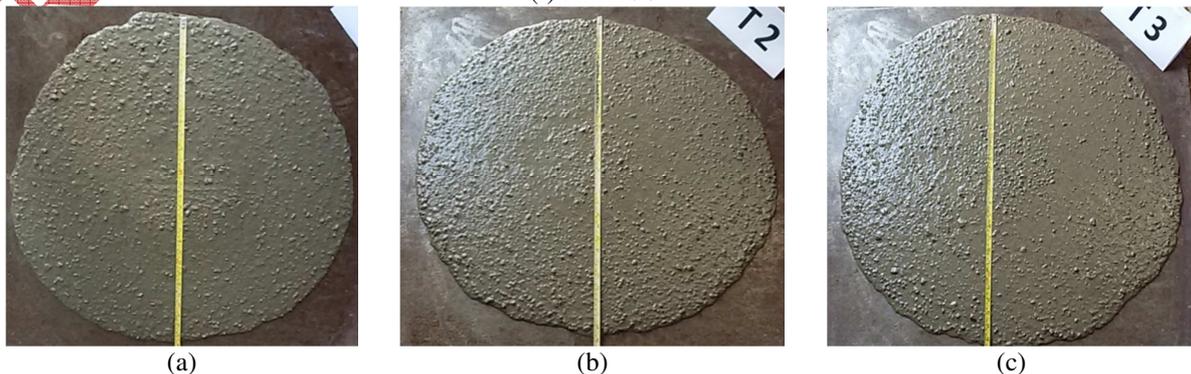
Fonte: arquivo dos autores

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. Contudo, em função do resultado do ensaio do anel J, deveria ter sido utilizado um equipamento com duas barras, não sendo possível pela indisponibilidade do mesmo.

O índice de estabilidade visual foi determinado imediatamente após o término do espalhamento do concreto, conforme a ABNT NBR 15823-2:2017 (ABNT, 2017), sendo determinado visualmente pela análise do concreto.

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.

Figura 4 – Estabilidade visual dos concretos. (a) AN REF. (b) AGR 30. (c) AGR 50. (d) AGR 100. (e) AMR 30. (f) AMR 50





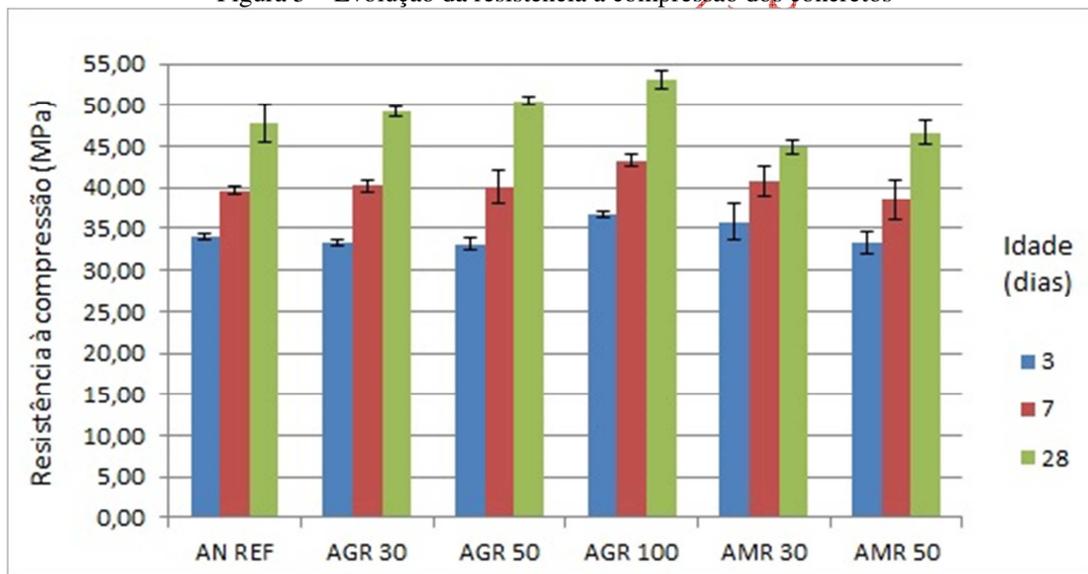
Fonte: arquivo dos autores

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.

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, da 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 concreto de referência (AN REF). Para estes 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, dentre elas pode-se destacar: o agregado reciclado possui maior rugosidade superficial, possibilitando uma melhor aderência com a pasta de cimento; o elevado teor de absorção de água pode reduzir a relação água/cimento 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) em seus estudos observaram que traços contendo agregado reciclado obtiveram resistências iniciais elevadas, em função da presença de cimento parcialmente hidratado aderido ao agregado, 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 a nanosílica pode melhorar a microestrutura da pasta de cimento, por meio do preenchimento dos vazios pela nanosílica, tornando a microestrutura mais densa (efeito *filler*). Além disso, a reação pozolânica de nanopartículas com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ livre é produzida durante a hidratação do cimento, formando mais gel de C-S-H, resultando na melhora das propriedades mecânicas.

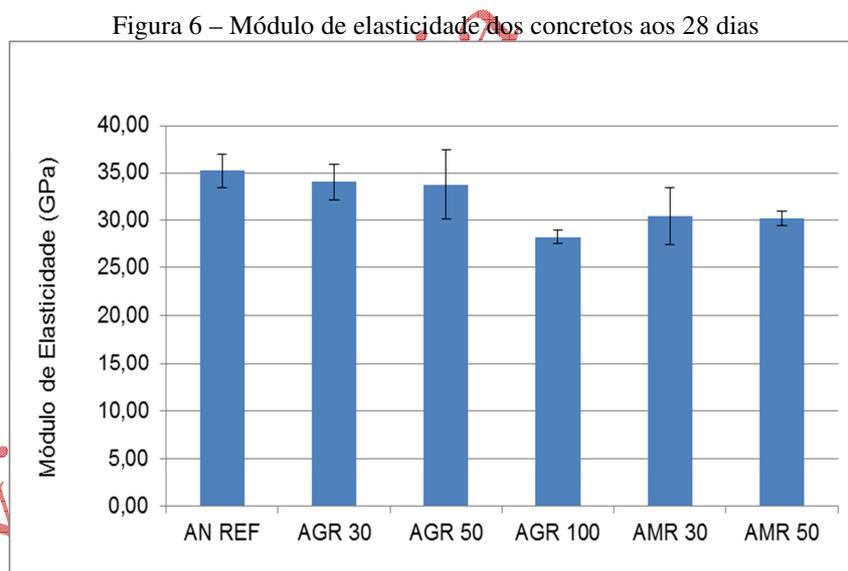
Na pesquisa de Tuyan, Mardani-Aghabaglou e Ramyar (2014), verificou-se que a maior resistência à compressão de concretos autoadensáveis foi alcançada para teores de substituição do agregado natural pelo reciclado de 25% e 40%, tendo sido incorporada também cinza volante às misturas avaliadas.

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, tornando-a mais porosa, o que consequentemente reduzirá a resistência à compressão.

Na revisão de literatura realizada por Santos, Silva e Brito (2019) e Silva e Melo (2023), permite-se afirmar que o uso do agregado reciclado na produção de concretos, inclusive autoadensáveis, é viável. Ainda que as propriedades do agregado reciclado sejam inferiores aos 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.



Fonte: dados da pesquisa

Os traços com a incorporação de agregados reciclados apresentaram valores médios de módulo de elasticidade inferiores ao concreto de referência, de forma decrescente. Ou seja, quanto maior a porcentagem de substituição menor foi 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 já era esperado devido à maior porosidade e 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 a sua rigidez e capacidade de restringir a deformação da matriz. Outra característica importante é a massa específica, pois

geralmente agregados densos possuem um alto módulo de elasticidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Salesa *et al.* (2016) mostram que, apesar do aumento da resistência à compressão para o concreto com o teor de 100% de agregado reciclado, houve redução de 17,2% no resultado do ensaio de módulo de elasticidade, que pode ter sido ocasionado devido à 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 de 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 e este reduziu à medida que aumentou o teor de incorporação do agregado miúdo reciclado, explicada pela 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 6.

Tabela 6 – Absorção de água, índice de vazios e massa específica

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

Fonte: dados da pesquisa

Os traços com a incorporação de agregados reciclados apresentaram absorção de água superior ao concreto referência, de forma crescente. Ou seja, quanto maior o teor de substituição maior foi o resultado da 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) e 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) apresentam resultados de absorção de água crescentes à medida que foi aumentando o teor de agregado reciclado na mistura, o que não impactou na resistência à compressão do concreto, uma vez que os traços com agregados reciclados atingiram valores de resistência à compressão superiores ao 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 de índice de vazios superiores ao 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) e para os agregados miúdos 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 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.

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 inferior ao concreto 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 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 trabalhabilidade dos concretos autoadensáveis estudados, mesmo realizando a compensação de água devido à maior absorção de água dos agregados reciclados. A perda de fluidez e trabalhabilidade ocasionada pelos agregados reciclados nos concretos podem ser corrigidas 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;
- Ao comparar 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 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) e 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 ao concreto referência, de forma crescente. Ou seja, 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 com a maior capacidade de absorção de água destes 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 concreto de referência. Isso se deve ao fato do agregado reciclado possuir menor massa específica que o agregado natural e, 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, profundidade de penetração dos íons cloreto e o ataque por sulfatos de concretos produzidos com agregado reciclado.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

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

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 8522**: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021.

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, 2021.

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

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, 2017.

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

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, 2017.

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

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, 2017.

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

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

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

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, 2021.](#)

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

ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. **Pesquisa setorial ABRECON 2020**: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil. ANGULO, S. C.; OLIVEIRA, L. S.; MACHADO, L. (org.). São Paulo: EPUSP, 2022. DOI: <https://doi.org/10.11606/9786589190103>.

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. **Memorias [...]**. Valencia, p. 257-266, 2008.

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]. Disponível em: <https://abrelpe.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: 05 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, 11 p., 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, 16 p., 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>.

Revista Principia - Early View