

SUBMETIDO 12/07/2022

APROVADO 30/09/2022

PUBLICADO ON-LINE 13/10/2022

PUBLICADO 10/07/2024

EDITORA ASSOCIADA

Nelma Mirian Chagas Araújo Meira

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2022id7086>

ARTIGO ORIGINAL

Uso de resíduos de construção e demolição como agregado reciclado no concreto: uma breve revisão de literatura

 Heron Freitas Resende ^[1]

 Elvys Dias Reis ^{[2]*}

 Francielle Martins Fernandes ^[3]

 Luísa Araújo Rodrigues ^[4]

 Francisco Almeida Angelo ^[5]

[1] heronfr@hotmail.com

[3] franciellefernandeseng@gmail.com

[4] luisaaraujorodrigues@gmail.com

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil

[2] elvys@cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Brasil

[5] francisco.angelo@ifba.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), Brasil

RESUMO: A construção civil é um dos setores mais importantes na economia mundial, porém, também é o maior gerador de resíduos, devido aos desperdícios, ao uso de materiais de baixa qualidade, à falta de controle tecnológico, a reformas e demolição. Nesse contexto, uma das aplicações para os resíduos gerados é a sua utilização como agregados reciclados (AR) em substituição aos agregados naturais (AN) em materiais cimentícios. Então, o emprego de AR para a fabricação de materiais destinados para fim estrutural, como o concreto, precisa ser mais bem investigado, de maneira que o limite máximo permitido pela NBR 15116 (20% de substituição) possa ser aumentado com segurança em futuras revisões. Com essa perspectiva, este trabalho apresenta uma breve revisão de literatura, elucidando algumas das principais propriedades dos resíduos de construção e demolição quando empregados no concreto, como heterogeneidade, trabalhabilidade e porosidade, resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e resistência à abrasão, absorção de água, carbonatação e penetração de íons cloreto.

Palavras-chave: agregado reciclado; construção sustentável; materiais à base de cimento Portland; resíduos de construção civil.

Using construction and demolition waste as recycled aggregate in concrete: a brief literature review

ABSTRACT: Civil construction is one of the most important sectors in the world economy, however, it is also the largest waste generator, due to low-quality materials, lack of technological control, waste, renovation, and demolition. In this context, one of the applications for the waste generated is its use as recycled aggregates (RA) to replace natural aggregates (NA) in cementitious materials. Therefore, the use of RA for the manufacture of materials intended for structural purposes, such as concrete, needs to be better investigated,

*Autor para correspondência.

so that the maximum limit allowed by NBR 15116 (20% substitution) can be safely increased in future revisions. With this perspective, this paper presents a brief literature review, elucidating some of the main properties of civil and demolition waste when used in concrete, such as heterogeneity, workability and porosity, compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity and abrasion resistance, water absorption, carbonation, and penetration of chloride ions.

Keywords: construction and demolition waste; Portland cement-based materials; recycled aggregate; sustainable construction.

1 Introdução

O setor da construção civil, apesar de ser destaque na economia de um país, gera impactos negativos, tanto pela extração e consumo de recursos naturais quanto pela modificação provocada no meio ambiente em razão dos resíduos gerados nas obras e demolições. Nesse aspecto, os resíduos de construção e demolição (RCD) representam a maior quantidade em massa de resíduos sólidos urbanos (Silva; Brito; Dhir, 2014). Em cidades brasileiras de grande e médio porte, a geração de RCD responde por 41% a 71% do total de resíduos sólidos gerados, em massa (Gomes *et al.*, 2019). Além disso, eles são geralmente despejados em locais impróprios, sendo que em 2012 se reciclava apenas 6% do que se gerava (IPEA, 2012). Esse número continua baixo ainda em 2022, pois, embora países desenvolvidos apresentem excelentes valores percentuais de reciclagem, como a Alemanha (67%), a maioria ainda continua destinando inadequadamente os resíduos. No Brasil, o índice de reciclagem era de apenas 4% em 2022, de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Granda, 2022), um valor ainda menor do que dez anos antes.

Os problemas relacionados aos RCD ocorrem devido a vários fatores, entre eles o descarte em locais inadequados, como bota-fora, encostas, lotes vagos, estradas, áreas urbanas e locais protegidos por lei, gerando gastos excessivos para a administração pública. O descarte não regulamentado dos RCD aumenta o gasto de recursos públicos e os problemas de inundações e proliferação de vetores nocivos à saúde pública (Sales; Souza, 2009).

A responsabilidade do gerenciamento dos RCD é dos geradores (IPEA, 2012). Trata-se de um problema global, sendo que os países da União Europeia têm feito esforços para passar de seu tradicional sistema de gestão de recursos e resíduos no setor da construção civil para um nível maior de circularidade (Zhang *et al.*, 2022). Entretanto, devido à falta de fiscalização e punição dos órgãos públicos em relação a esses responsáveis, os municípios gastam grande quantidade das verbas para gestão dos RCD. Como a maioria dos países não tem plano de tratamento específico para esses materiais, eles são enviados para aterros e não são reutilizados ou reciclados em novas construções (Silva; Brito; Dhir, 2014). Além disso, a indústria da construção civil demanda grande consumo de matérias-primas naturais para fabricação de cimento e para os agregados das argamassas e concretos. O aumento do consumo desses recursos escassos tem causado grandes impactos ambientais, muitas vezes irreversíveis (Silva; Brito; Dhir, 2016). A reutilização dos RCD como substituição dos agregados, então, possibilita a redução da utilização de matéria-prima natural, que é escassa e onerosa, tornando-se viável para o meio ambiente e para a economia (Martínez *et al.*, 2016).

Nesse contexto, o mercado da construção civil é uma ótima opção para reaproveitar materiais reciclados. A utilização de agregados reciclados (AR) como substitutos de agregados naturais (AN) na produção de novos materiais de construção é considerada um dos métodos mais eficientes para agregar valor a esses resíduos, frequentemente considerados inúteis (Silva; Brito; Dhir, 2016). A incorporação de RCD na produção de materiais e elementos construtivos reduz a utilização de AN, o que permite a redução do custo final das habitações (Malta; Silva; Gonçalves, 2013). Além disso, o desempenho dos materiais de concreto contendo AR de RCD é um parâmetro crucial para a tomada de decisão quanto à sua incorporação no concreto (Abera, 2022).

Os AR de concreto geralmente contêm argamassa residual aderida em sua superfície, sendo então mais porosos e, conseqüentemente, tendo maior capacidade de absorção de água. Além disso, têm menor densidade específica e propriedades mecânicas inferiores às dos AN, o que pode ser um ponto negativo quando da sua utilização em materiais à base de cimento (Kapoor; Singh; Singh, 2016; Limbachiya; Meddah; Ouchagour, 2012). De acordo com a norma brasileira NBR 15116 (ABNT, 2021), quando destinada a concretos de cimento Portland, a substituição de AN por AR deve ser limitada a 20% da massa total de agregados, considerando como fonte somente concretos das classes de agressividade I e II da NBR 6118 (ABNT, 2014). Entende-se que esse percentual esteja relacionado à grande variabilidade dos RCD e, sobretudo, à qualidade da sua composição. Além disso, em termos de contaminantes (< 1%), algumas das normas internacionais são mais restritivas do que a brasileira (DIN, 2002). Assim, o uso de AR para fabricação de materiais destinados para fins estruturais precisa ser melhor investigado, de maneira que esse limite estabelecido pela NBR 15116 seja aumentado em futuras revisões. Com essa perspectiva, o objetivo deste artigo é elucidar, através de uma breve revisão de literatura, algumas das principais propriedades dos RCD quando empregados no concreto, como heterogeneidade, trabalhabilidade e porosidade, resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e resistência à abrasão, absorção de água, carbonatação e penetração de íons cloreto.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: a seção 2 é composta pela metodologia para a realização do levantamento bibliográfico; na seção 3, são apresentados os principais resultados e discussões a respeito da heterogeneidade dos RCD, da trabalhabilidade, da porosidade e das propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos com agregados reciclados de RCD; por fim, na seção 4, são apresentadas as considerações finais do estudo.

2 Metodologia

Para a seleção dos referenciais teóricos e construção do conhecimento visado nesta pesquisa, utilizou-se a metodologia Proknow-C (*Knowledge Development Process – Constructivist*), proposta por Ensslin *et al.* (2010), que consiste em uma série de procedimentos para seleção dos artigos que têm relevância para o tema da pesquisa (Afonso *et al.*, 2011).

Na primeira etapa, foram definidos os parâmetros da pesquisa. Para o estudo do uso de resíduos de construção e demolição como agregado reciclado no concreto, buscou-se as palavras-chave “resíduos de construção e demolição”, “agregados reciclados” e “concreto”. A busca foi restrita a artigos publicados nos últimos dez anos e ao banco de dados do Google Acadêmico, considerado como suficiente para levantar

trabalhos relevantes sobre o tema. Trata-se de uma base indexada no site da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, 2016), escolha que se justifica pela disponibilidade de textos completos com bom reconhecimento científico. Nas etapas seguintes, foram feitas a análise, a organização dos dados extraídos em uma planilha e a síntese das informações. Por fim, fez-se a discussão e a consolidação dos resultados por meio da escrita científica.

Do portfólio de trabalhos selecionados, detalhou-se a composição percentual dos RCD, resultados relacionados à trabalhabilidade de concretos de AR e às propriedades desses compósitos, a granulometria, a densidade, a absorção de água e, conseqüentemente, a porosidade. Foram detalhadas também as propriedades mecânicas de resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e resistência à abrasão, e de durabilidade, como absorção de água, carbonatação e penetração de íons cloreto.

3 Resultados e discussões

Nesta seção, são apresentados os resultados e as discussões a respeito das principais lentes de pesquisa apresentadas na metodologia proposta, a saber: heterogeneidade dos RCD, trabalhabilidade, porosidade e propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos com agregados reciclados de RCD.

3.1 Heterogeneidade dos resíduos de construção e demolição

Os resíduos de construção e demolição são compostos por diferentes fases, como cerâmica, argamassa, concreto, vidro, entre outras, fato esse que dificulta a separação eficiente das diferentes frações devido à heterogeneidade do material. A variabilidade dos métodos de construção de edifícios faz com que os agregados provenientes de RCD variem em qualidade e composição, conduzindo à produção de materiais de construção de qualidade variável (Silva; Brito; Dhir, 2014). Frotté *et al.* (2017), por exemplo, relataram granulometria bastante diversificada e composição muito heterogênea dos RCD utilizados em seu estudo, que foram obtidos da Usina de Recicláveis Sólidos do Paraná S/A.

Segundo Yeheyis *et al.* (2013), práticas sustentáveis como a reutilização e a reciclagem de grandes quantidades de RCD em outros materiais ainda são um desafio, mesmo que diversas soluções estejam sendo desenvolvidas. Tais práticas exigem um controle tecnológico rigoroso, pois os RCD variam conforme o local, o método construtivo, os materiais de construção, o método de demolição, as formas de gerenciamento de uma obra, entre outros fatores, o que diversifica totalmente as suas características e propriedades.

Kaza *et al.* (2018) apresentaram em seu estudo a geração de resíduos global, discriminando-a por região. Com dados atualizados até o ano de 2016, os autores relataram os seguintes números, em toneladas por ano: 129, no Oriente Médio e no Norte da África; 174, na África Subsaariana; 231, na América Latina e no Caribe; 289, na América do Norte; 334, no Sul da Ásia; 392, na Europa e na Ásia Central; e 468, na Ásia Oriental e no Pacífico. Assim, observa-se que não somente as propriedades dos resíduos gerados são diferentes, mas também a quantidade em que são gerados em cada região do mundo.

Tabela 1 ▼
Composição percentual dos resíduos de construção civil estudados nos artigos do portfólio.
Fonte: dados da pesquisa

Posto isso, a Tabela 1 apresenta a composição percentual dos RCD apresentados em alguns dos artigos selecionados para este estudo.

Referência	Local	Con	Arg	Cer	Sol	Mad	Plc	Vid	Met	Div
IPEA (2012)	São Carlos, Brasil	19,0	8,0	40,0	9,0	7,0	8,0	10,0	–	–
Rodrigues <i>et al.</i> (2013)	Recife, Brasil	69,0	1,0	4,0	3,0	–	–	–	–	23,0
Ledesma <i>et al.</i> (2015)	Espanha	0,4	39,8	53,9	–	–	–	–	–	5,9
Rosado (2015)	Limeira, Brasil	7,7	–	11,3	50,3	4,7	–	–	–	26,3
Brinckner (1993) <i>apud</i> Silva, Brito e Dhir (2016)	Bélgica	14,0	15,0	–	29,1	27,5	0,7	–	3,9	9,1

Notas: Con: concreto; Arg: argamassa; Cer: cerâmica; Sol: solos ou finos; Mad: madeira; Plc: plástico; Vid: vidro; Met: metais; Div: diversos.

Na Tabela 1, a distinção de locais para coleta de dados foi priorizada, a fim de que fosse possível uma análise mais ampla da composição dos RCD. Pelos dados, nota-se a diversidade da composição do resíduo conforme o local coletado. Por exemplo, os RCD coletados em Recife por Rodrigues *et al.* (2013) são compostos majoritariamente de concreto (69%), enquanto aqueles coletados em Limeira, por Rosado (2015), contêm apenas 7,7% de concreto, mas 50,3% de solos ou finos. Em função dessa heterogeneidade dos RCD, a viabilidade de sua reutilização depende do seu gerenciamento, que envolve desde o processo em que foram produzidos até a coleta e o seu beneficiamento. Segundo Souza (2006), é na etapa de beneficiamento que se define a característica e, conseqüentemente, o destino dos RCD. A segregação dos RCD ocorre por meio da triagem visual e deve ser melhorada, sobretudo no que tange à classificação do material (Angulo; Mueller, 2009).

Silva, Brito e Dhir (2017) afirmam que, ao categorizar o AR com base em suas propriedades intrínsecas e não somente em sua composição, é possível maximizar sua incorporação sem perda significativa de desempenho. Os autores reafirmam essa ideia em outro artigo ao demonstrarem, por meio de análise estatística, que é possível obter um bom AR dos RCD, compatível com o natural, quando se consegue definir suas classificações e beneficiá-los corretamente (Silva; Brito; Dhir, 2014).

Entretanto, na prática, ainda existem lacunas para viabilizar a classificação e a segregação adequada, pois isso depende da conduta tomada nos estágios de planejamento, projeto, construção e demolição e da vida útil do projeto de construção. Por exemplo, se a conduta estabelecer que a separação dos RCD deva ocorrer durante a sua exploração, isso pode afetar o processo como um todo, sendo necessário deslocar mais mão de obra e equipamentos para o local da demolição; caso a separação ocorra após a exploração, equipes podem se concentrar em ambientes mais seguros e o processo pode ser mais otimizado. Para tanto, independentemente da tomada de decisão, o contexto indica que a demolição seletiva, ao usar técnicas de desmonte para separação dos materiais, deve ser feita de acordo com suas características, podendo facilitar a classificação e separação dos resíduos, obtendo um material de melhor qualidade.

No Japão, por exemplo, a lei relativa aos resíduos da construção civil determina que, para construir ou demolir edificações, o proprietário deve previamente apresentar à prefeitura um plano relativo à separação e reciclagem dos resíduos, e o construtor deve

separar os resíduos e reciclar materiais específicos (madeira, concreto e asfalto), e informar ao proprietário. A lei também exige que as empresas de demolição sejam registradas na prefeitura (Rosado, 2015). Com essas exigências, é possível ter um controle maior do gerenciamento de resíduos nas obras do país, propiciando a separação dos materiais e aumentando as possibilidades de reutilização.

3.2 Trabalhabilidade de concretos com agregados reciclados de RCD

É de extrema importância o conhecimento dos fatores que afetam a trabalhabilidade de uma mistura, visto que, independentemente dos materiais e do traço, os concretos e argamassas podem não desempenhar as funções desejadas (Dal Molin; Isaia, 2005). As características dos agregados são um dos fatores que afetam a trabalhabilidade e seu controle. O tamanho das partículas do agregado graúdo influencia na quantidade de água necessária para atingir determinada consistência. Além disso, areias muito finas ou angulosas necessitam de mais água para se obter uma dada consistência (Mehta; Monteiro, 2008).

De acordo com a norma brasileira NBR 15116 (ABNT, 2021), para o preparo do concreto sem função estrutural com uso de AR, é necessário que os agregados miúdo e graúdo sejam pré-molhados. Esse método tem mostrado que valores de aproximadamente 80% do teor de absorção de água do AR são adequados.

Nesse sentido, a Tabela 2 mostra os resultados obtidos por diferentes autores em relação à trabalhabilidade do concreto contendo resíduos de construção e demolição, sendo todos os AR desse portfólio pré-molhados nos estudos.

Tabela 2 ▼
Trabalhabilidade de concretos contendo agregados reciclados de RCD.
Fonte: dados da pesquisa

Referência	Substituição percentual de agregados reciclados	Resultado do slump test	Uso de aditivo superplastificante
Marie e Qiasrawi (2012)	0%	75 mm	Não
	5%	65 mm	Não
	10%	52 mm	Não
	15%	45 mm	Não
	20%	41 mm	Não
Wagih <i>et al.</i> (2013)	0%	100 ± 20 mm	Sim
	25%	100 ± 20 mm	Sim
	50%	100 ± 20 mm	Sim
	75%	100 ± 20 mm	Sim
	100%	100 ± 20 mm	Sim
Sharma e Singla (2014)	0%	85 mm	Não
	20%	–	Não
	40%	–	Não
	60%	–	Não
	80%	–	Não
Bravo <i>et al.</i> (2015)	100%	42 mm	Não
	0%	114 mm	Não
	10%	125 mm	Não
	25%	121 mm	Não
	50%	126 mm	Não
Frotté <i>et al.</i> (2017)	100%	124 mm	Não
	0%	60 mm	Não
	25%	50 mm	Não
	50%	35 mm	Não

A Tabela 2 mostra que apenas o estudo de Wagih *et al.* (2013) obteve aumento da trabalhabilidade. Isso ocorreu por ser ele o único trabalho em se que fez uso de aditivo superplastificante, visando somente diminuir a quantidade de água e, conseqüentemente, aumentar a resistência e fluidez do concreto, e não modificar os agregados. Os outros estudos indicaram que a trabalhabilidade do concreto diminui com o aumento da quantidade de AR. Marie e Quiasrawi (2012) e Sharma e Singla (2014) atribuíram essa redução à maior capacidade de absorção de água dos AR em relação aos AN.

3.3 Porosidade de concretos com agregados reciclados de RCD

Na pesquisa de Angulo *et al.* (2010), os autores citam que a porosidade dos RCD afeta a trabalhabilidade do concreto, as propriedades mecânicas e a durabilidade. Por isso, para manter sob controle a variabilidade das propriedades do concreto, o teor máximo de agregado de RCD deve ser limitado a uma fração de até 20% do agregado total. No estudo de Wagih *et al.* (2013), demonstrou-se que, para concreto estrutural, a densidade aparente do concreto com AR é menor que a do concreto com AN. O valor mais baixo da densidade do concreto com AR pode ser atribuído à maior porosidade desses agregados. Nesse mesmo estudo, a absorção de água variou entre 2,15% e 7,15%, valor relativamente mais alto que os apresentados pelo concreto com AN, que teve valor máximo igual a 2,5%.

Tabela 3 ▼

Propriedades dos concretos com agregados reciclados experimentados nos artigos do portfólio.
Fonte: dados da pesquisa

Diante disso, a Tabela 3 apresenta algumas das principais propriedades de concretos com AR relatadas nos artigos do portfólio, como a granulometria. Destaca-se que nem todos os autores disponibilizaram as curvas granulométricas em seus estudos; por isso, em relação à granulometria, neste trabalho se apresenta somente a dimensão máxima característica do agregado, $D_{máx}$.

Referência	Agregado	$D_{máx}$ [mm]	Densidade [mg/m ³]	Absorção [%]	Porosidade [%]
García-González <i>et al.</i> (2015)	AN	3,4	2,62	0,15	11,09
	AR	7,3	2,54	1,73	14,16
	AR	7,7	2,00	11,31	12,70
Rodrigues <i>et al.</i> (2013)	AR	4,0	2,68	10,06	–
	AR	4,0	2,60	4,71	–
Silva, Brito e Dhir (2014)	AR	4,0	2,40	3,50	–
	AR	4,0	2,10	8,50	–
	AR	4,0	1,80	15,00	–
Ledesma <i>et al.</i> (2015)	AN	4,0	2,63	0,79	–
	AR	4,0	2,14	9,00	–
Contreras <i>et al.</i> (2016)	AR	4,8	1,72	18,51	32,09
	AR	4,8	1,75	18,06	31,62
	AR	4,8	1,80	19,09	32,11
Martínez <i>et al.</i> (2016)	AN	4,0	2,45	0,92	–
	AR	4,0	2,13	6,88	–

A Tabela 3 mostra que, via de regra, quando há aumento da densidade, ocorre diminuição das outras propriedades. Destacam-se os resultados obtidos por Contreras *et al.* (2016), pois, dos três traços estudados, o de maior densidade foi o que apresentou maior porosidade (32,11%) e maior absorção de água (19,09%), o que se deve à maior granulometria, que impediu que os poros fossem preenchidos.

3.4 Propriedades mecânicas

As subseções a seguir apresentam os resultados de resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e resistência à abrasão.

3.4.1 Resistência à compressão

A Tabela 4 apresenta os resultados de resistência à compressão aos 28 dias para cada percentual de substituição de RCD utilizado nos artigos do portfólio.

Tabela 4 ▼
Resistência à compressão [MPa] aos 28 dias de concretos com RCD.
Fonte: dados da pesquisa

Referência	Concreto	Percentual de substituição de agregados reciclados			
		20%	50%	100%	–
Kou, Poon e Chan (2004)	CR	66,8	–	–	–
	AMR	62,4	55,8	42,0	–
		10%	30%	50%	100%
Pereira, Evangelista e Brito (2012)	CR-SSP	39,5	–	–	–
	CR-SP1	53,3	–	–	–
	CR-SP2	65,2	–	–	–
	AMR-SSP	40,0	38,6	37,6	38,6
	AMR-SP1	53,7	51,0	47,8	45,1
	AMR-SP2	64,6	65,4	63,2	63,0
		20%	50%	100%	–
		CR	46,2	–	–
Alves <i>et al.</i> (2014)	TT	42,9	41,8	41,7	–
	LT	31,2	30,7	26,6	–
		10%	25%	50%	100%
Bravo <i>et al.</i> (2015)	CR	53,9	–	–	–
	AGR (A)	52,3	54,1	48,4	42,0
	AGR (B)	53,7	50,0	48,8	51,1
	AGR (C)	45,4	46,0	46,6	36,2
	AMR (A)	49,2	45,6	37,6	30,2
	AMR (B)	51,6	47,3	46,8	38,4
	AMR (C)	50,3	44,7	44,5	29,9
		0%	25%	50%	75%
		AMR (A)	24,7	23,8	21,4
Alexandridou, Angelopoulos e Coutelieris (2018)	AMR (B)	30,1	30,1	28,1	27,6
	AMR (C)	30,1	29,0	26,3	24,0

Notas: CR: concreto de referência; AGR: agregado graúdo reciclado; AMR: agregado miúdo reciclado; TT: tijolos triturados; LT: louças trituradas; SSP: sem superplastificante; SP1: superplastificante de pega normal; SP2: superplastificante de alto desempenho.

Os dados da Tabela 4 mostram que, para substituições de até 25% do AN pelo AR, a resistência à compressão foi pouco alterada, com exceção dos concretos moldados com agregado miúdo reciclado (AMR) da usina C, do artigo de Bravo *et al.* (2015), e com louças trituradas, do artigo de Alves *et al.* (2014). Na pesquisa de Bravo *et al.* (2015), houve um aumento dessa propriedade para o concreto com agregado graúdo reciclado (AGR) das usinas A (em até 25% de substituição) e C (em até 50% de substituição). Em contrapartida, verificou-se uma acentuada diminuição da resistência quando substituído 100% do AN pelo AR. Os AR apresentam uma superfície rugosa, por isso, absorvem maior quantidade de água quando comparados aos AN, o que causa uma ligação inadequada entre o AR e a pasta de cimento. Tal fato provoca um aumento da porosidade dessas misturas e, conseqüentemente, uma redução da resistência à compressão. Essa redução também pode ser explicada pelo fato de o AR ser menos resistente que o AN (Kou; Poon; Etxeberria, 2014). É importante ressaltar que houve uma composição variável dos AR em todos os estudos, além das diferentes granulometrias em cada estudo, e essa diferença está diretamente relacionada aos resultados apresentados. Por exemplo, maiores percentuais de substituição de agregados graúdos com elevada absorção de água conduziram às maiores reduções das propriedades mecânicas.

Quanto ao estudo dos concretos com AR nos quais foram incorporados superplastificantes, Pereira, Evangelista e Brito (2012) constataram que a diferença dos resultados entre os concretos de referência e os concretos com 100% de substituição de AN por AR foi relativamente pequena. Os concretos com adições de superplastificante de pega normal (SP1) apresentaram uma redução da resistência à compressão superior às outras misturas à medida que se aumentou o AMR, devido à maior relação água/cimento (a/c). Deduz-se, então, que a eficiência dos superplastificantes na resistência à compressão está intrinsecamente associada à redução da relação a/c e a uma menor incorporação de AMR na mistura.

Tabela 5 ▼

3.4.2 Resistência à tração

Resistência à tração [MPa] aos 28 dias de concretos com RCD.

Fonte: dados da pesquisa

Na Tabela 5, apresentam-se os valores de resistência à tração aos 28 dias para cada percentual de substituição de RCD utilizado em alguns dos artigos do portfólio.

Referência	Concreto	Percentual de substituição de agregados reciclados			
		20%	50%	100%	–
Kou, Poon e Chan (2004)		20%	50%	100%	–
	CR	3,43	–	–	–
	AMR	3,16	2,97	2,84	–
Alves <i>et al.</i> (2014)		20%	50%	100%	–
	CR	3,60	–	–	–
	TT	3,53	3,40	3,42	–
	LT	2,71	2,60	2,38	–
Bravo <i>et al.</i> (2015)		10%	25%	50%	100%
	CR	3,7	–	–	–
	AGR (A)	3,7	3,0	3,2	3,1
	AGR (B)	3,7	3,2	3,0	2,6
	AGR (C)	3,4	3,5	3,4	3,2
	AMR (A)	3,9	3,7	3,4	2,6
	AMR (B)	4,1	3,1	3,4	3,6
AMR (C)	3,5	3,8	3,6	2,6	

Notas: CR: concreto de referência; AGR: agregado graúdo reciclado; AMR: agregado miúdo reciclado; TT: tijolos triturados; LT: louças trituradas.

Para as pesquisas apresentadas, assim como no estudo da resistência à compressão, notou-se que, para substituições de até 25% de AN pelo AR, a resistência à tração também foi pouco alterada, exceto para os concretos feitos com AMR da usina A, do artigo de Bravo *et al.* (2015), e com louças trituradas, do artigo de Alves *et al.* (2014). Os autores concluíram que a resistência à tração também diminui quando se substitui 100% do AN pelo AR. Essa redução pode ser explicada devido ao aumento da porosidade da pasta de cimento quando se aumenta a substituição pelo AR (Kou; Poon; Etxeberria, 2014). Para essa propriedade, assim como na análise da resistência à compressão, observa-se que a composição distinta dos AR tem grande influência nos resultados apresentados.

No estudo de Bravo *et al.* (2015), os autores concluíram que a resistência à tração diminui à medida que a substituição dos AMR aumenta. Porém, os dados da tabela mostram que houve uma redução dessa propriedade ao se comparar o concreto com 100% de AR ao concreto com 10% de AR. Era esperado que, à medida que houvesse aumento da porcentagem do AR, a resistência à tração diminuísse. No entanto, o concreto com AMR da usina A apresentou resultado de resistência à tração no valor de 3,6 MPa com 100% de substituição de AN por AR, enquanto nas substituições de 50% e 25% foram obtidas as resistências de 3,4 MPa e 3,1 MPa, respectivamente, contrariando as conclusões dos autores já citados.

Tabela 6 ▼

Módulo de elasticidade [GPa]
de concretos com RCD.
Fonte: dados da pesquisa

3.4.3 Módulo de elasticidade

Na Tabela 6, são apresentados os resultados dos estudos de alguns autores referentes ao módulo de elasticidade dos concretos com AR provenientes de RCD.

Referência	Concreto	Percentual de substituição de agregados reciclados			
		20%	50%	100%	–
Kou, Poon e Chan (2004)		20%	50%	100%	–
	CR	32,3	–	–	–
	AMR	30,4	26,6	22,8	–
Alves <i>et al.</i> (2014)		20%	50%	100%	–
	CR	38,3	–	–	–
	TT	32,4	31,6	27,2	–
	LT	31,3	31,0	28,3	–
Bravo <i>et al.</i> (2015)		10%	25%	50%	100%
	AGR (A)	40,8	38,4	34,8	26,7
	AGR (B)	38,7	39,2	35,9	29,9
	AGR (C)	39,8	36,9	34,3	25,2
	AMR (A)	38,6	34,9	31,9	23,3
	AMR (B)	40,3	38,0	37,4	32,5
	AMR (C)	40,2	37,5	35,6	26,0

Notas: CR: concreto de referência; AGR: agregado graúdo reciclado; AMR: agregado miúdo reciclado; TT: tijolos triturados; LT: louças trituradas.

Em todas as pesquisas apresentadas na Tabela 6, é possível perceber que, para substituições de até 25% de AN por AR, o módulo de elasticidade se alterou pouco. No

estudo de Bravo *et al.* (2015), observou-se ainda que, para o concreto com AGR da usina B, quando se substitui 25% do AN pelo AR, ocorre um ganho de rigidez de 0,5 GPa. Entretanto, a análise dos demais estudos mostra que o módulo de elasticidade diminui à medida que se aumenta o teor de substituição. Essa redução pode ser explicada pelo fato de que, à medida que se aumenta a substituição pelo AR, a argamassa sofre uma grande perda de rigidez, justamente por conta da menor rigidez dos AR, pela maior relação a/c e, conseqüentemente, pela elevada porosidade do concreto, afetando consideravelmente o módulo de elasticidade. Além disso, a composição variável dos AR é o principal fator que influencia nessa propriedade (Alves *et al.*, 2014; Bravo *et al.*, 2015).

3.4.4 Resistência à abrasão

Tabela 7 ▼
Resistência à abrasão de concretos com RCD.
Fonte: dados da pesquisa

A Tabela 7 apresenta os resultados de resistência à abrasão para cada percentual de substituição de RCD utilizado nos artigos do portfólio em que tal propriedade foi estudada. Especificamente, essa propriedade foi estudada a partir dos ensaios de perda de massa e de perda de superfície (profundidade) do corpo de prova.

Referência	Concreto	Percentual de substituição de agregados reciclados			
		Perda de massa [%]			
Alves <i>et al.</i> (2014)		20%	50%	100%	–
	CR	4,0	–	–	–
	TT	4,4	4,7	5,3	–
	LT	5,7	5,7	6,0	–
		Perda de superfície do corpo de prova [mm]			
Bravo <i>et al.</i> (2015)		10%	25%	50%	100%
	CR	7,6	–	–	–
	AGR (D)	7,2	6,7	6,6	6,3
	AGR (F)	7,5	6,9	7,1	6,4
	AMR (A)	7,2	8,9	10,1	11,5
	AMR (B)	8,0	8,0	7,9	8,9

Notas: CR: concreto de referência; AGR: agregado gráúdo reciclado; AMR: agregado miúdo reciclado; TT: tijolos triturados; LT: louças trituradas.

A Tabela 7 mostra que a resistência à abrasão diminui com o aumento da substituição de AN por AMR. Essa redução pode ser explicada pela maior relação a/c das misturas e pela diferente composição do AMR (Alves *et al.*, 2014; Bravo *et al.*, 2015).

Apesar de o uso de AMR diminuir a resistência à abrasão, Bravo *et al.* (2015) concluíram que o uso de AGR aumentou essa propriedade no concreto. Esse acréscimo se deve a uma melhor ligação entre a pasta de cimento e a cerâmica contida no AR das amostras D e F, pois a maior porosidade desse AR permite uma melhor penetração da pasta cimentícia em seu interior (Brito *et al.*, 2005 *apud* Bravo *et al.*, 2015). Assim, tem-se que o principal fator que interfere na resistência à abrasão é o tamanho do AR usado e que a substituição completa dos agregados gráúdos naturais levou a um aumento da resistência à abrasão maior do que 15% nesse estudo, independentemente da fonte do AGR.

3.5 Propriedades de durabilidade

As subseções a seguir apresentam os resultados de absorção de água por imersão e por capilaridade, carbonatação e penetração de íons cloreto.

3.5.1 Absorção de água por imersão e por capilaridade

Segundo Bravo *et al.* (2015), o teste de absorção de água por imersão permite avaliar os poros existentes dentro do concreto. Eles ocorrem principalmente devido aos poros existentes nos agregados, que são provenientes do ar que permanece após a mistura dos componentes. A absorção de água por capilaridade, por sua vez, consiste na penetração de um fluido no concreto através da ação de gradientes de pressão. Isso ocorre quando o líquido entra em contato com os poros e é forçado a penetrar nos poros devido a forças capilares que aumentam à medida que o diâmetro dos poros diminui.

Quadro 1 ▼

Análise da absorção de água por imersão e por capilaridade de concretos contendo RCD.

Fonte: dados da pesquisa

O Quadro 1 mostra os resultados para quatro estudos de absorção de água do concreto com adição de RCD. Os artigos não mostram valores exatos, apenas gráficos, por isso, a síntese foi feita tendo em consideração apenas o aumento ou a diminuição das propriedades.

Referência	Percentual de substituição de agregados reciclados	Absorção de água por imersão	Absorção de água por capilaridade
Evangelista e Brito (2010)	0%, 30%, 100%	Aumentou com o aumento da quantidade de resíduos	Aumentou com o aumento da quantidade de resíduos
Bravo <i>et al.</i> (2015)	0%, 10%, 25%, 50%, 100%	Aumentou com o aumento da quantidade de resíduos	Aumentou com o aumento da quantidade de resíduos
Cartuxo <i>et al.</i> (2016)	0%, 10%, 30%, 50%, 100%	Aumentou com o aumento da quantidade de resíduos	Aumentou com o aumento da quantidade de resíduos
Alexandridou, Angelopoulos e Coutelieris (2018)	0%, 25%, 50%, 75%	Aumentou com o aumento da quantidade de resíduos	Aumentou com o aumento da quantidade de resíduos

Como se pode observar, a incorporação de resíduos ao concreto causa aumento de absorção de água tanto por imersão quanto por capilaridade. Segundo Wirquin *et al.* (2000 *apud* Evangelista e Brito, 2010), a quantidade de água absorvida aumenta porque a presença de resíduos cria mais poros capilares longos como consequência da sua própria porosidade e geometria. Havendo mais poros na mistura, além da absorção do próprio agregado, ocorre maior absorção para os interstícios existentes na mistura do concreto. Assim, os AR acabam por absorver parte da água de amassamento do concreto ainda no estado fresco, o que reduz a fluidez da mistura (Pelissari *et al.*, 2020).

3.5.2 Carbonatação e penetração de íons cloreto

Outro ensaio utilizado para avaliar a durabilidade do concreto é o de penetração de íons cloreto, que utiliza mecanismo de transporte de íons dentro do concreto. Esse

Quadro 2 ▼

Análise da carbonatação e resistência à penetração de íons cloreto em concretos contendo RCD.

Fonte: dados da pesquisa

mecanismo é complexo e pode incluir processos de difusão de água, impregnação e absorção capilar. A penetração de cloretos tem, juntamente com a carbonatação, a principal responsabilidade pela despassivação do aço (Bravo *et al.*, 2015), o que pode causar problemas ao concreto com RCD, como no concreto convencional. O Quadro 2 mostra os resultados de alguns trabalhos que avaliaram a carbonatação e a penetração de íons cloreto em concretos contendo RCD.

Referência	Percentual de substituição de agregados reciclados	Carbonatação	Resistência à penetração de íons cloreto
Evangelista e Brito (2010)	0%, 30%, 100%	Aumentou com o aumento da quantidade de resíduos	Aumentos de 30% e 33,8% para substituições de 30% e 100%, respectivamente
Bravo <i>et al.</i> (2015)	0%, 10%, 25%, 50%, 100%	Aumentou com o aumento da quantidade de resíduos	Pequeno aumento do coeficiente de difusão do cloreto com o aumento da quantidade de resíduos e decréscimo de acordo com o tempo
Cartuxo <i>et al.</i> (2016)	0%, 10%, 30%, 50%, 100%	Aumentou com o aumento da quantidade de resíduos	Grande aumento do coeficiente de difusão do cloreto com o aumento da quantidade de resíduos
Alexandridou, Angelopoulos e Coutelieris (2018)	0%, 25%, 50%, 75%	Aumentou com o aumento da quantidade de resíduos	–

Pode-se observar que as propriedades de carbonatação e resistência à penetração de íons cloreto também aumentaram conforme a quantidade de resíduo aumentava. De acordo com Bravo *et al.* (2015), esses resultados eram previsíveis, pois ambas as propriedades são afetadas pelo fator de absorção de água e o AR possui essa característica mais atenuada. Entretanto, sabe-se que o fenômeno da carbonatação também depende da umidade do ar, da temperatura, da dosagem do concreto e da concentração de CO₂ (Castellote *et al.*, 2009). Nesse sentido, Werle, Kazmierczak e Kulakowski (2011) afirmam que não existe consenso sobre o fenômeno e que é necessário realizar análises para estimar o comportamento do concreto ante a ação do CO₂ antes de se substituir AN por AR.

Como a durabilidade está diretamente ligada à porosidade do material e sua consequente absorção de água, Evangelista e Brito (2010) citaram que a adição de materiais cimentícios suplementares – por exemplo, sílica ativa, cinzas volantes e escórias de alto forno – como substituição parcial do cimento pode minimizar esse impacto. Tais adições, quando feitas às matrizes cimentícias, influenciam o processo da carbonatação, acelerando-o, quando alcalinas, ou retardando-o, quando propiciam o fechamento dos poros, dificultando a entrada de gás carbônico (Werle; Kazmierczak; Kulakowski, 2011).

4 Considerações finais

Realizou-se, neste trabalho, uma breve revisão de literatura sobre o uso de resíduos de construção e demolição (RCD) como agregado reciclado (AR) em concreto. As principais conclusões foram:

- i) A heterogeneidade dos RCD dificulta a padronização de possíveis formas de reutilização, pois o material apresenta composição totalmente diferente conforme local de onde foi obtido. Assim, legislações e fiscalizações devem ser implantadas, para que seja obrigatória a triagem dos resíduos dentro de cada obra;
- ii) É necessário conhecer a composição dos RCD que se pretende reutilizar para se estabelecer os processos de separação e beneficiamento adequados e então se obter um bom AR. Tal conhecimento pode influenciar na tomada de decisão quanto ao melhor momento para se fazer a separação dos materiais – antes ou após a sua exploração.
- iii) Como a substituição de agregados naturais (AN) por AR geralmente propicia um concreto com qualidade relativamente inferior ao concreto convencional, é preciso investigar melhor o desempenho de concreto com AR reforçado com adições minerais ou mesmo de fibras de aço, sintéticas, nanopartículas, entre outras.

Além disso, notou-se que o uso dos RCD:

- i) Reduz a trabalhabilidade do concreto quando se aumenta a quantidade de AR, devido à maior capacidade de absorção de água dos AR quando comparados com os AN. Contudo, quando se utiliza aditivo superplastificante, é possível ter um aumento dessa propriedade, não por melhorar as propriedades dos agregados, mas por reduzir a quantidade de água e aumentar a fluidez e a resistência da mistura;
- ii) Diminui a resistência à compressão e a resistência à tração quando substituído 100% do AN pelo AR, devido ao aumento da porosidade do concreto. Porém, também houve aumento dessas propriedades para algumas das misturas analisadas, considerando, sobretudo, agregados graúdos, para substituições de até 25% do AN;
- iii) Reduz o módulo de elasticidade quando se aumenta a porcentagem de substituição do AN pelo AR, devido à menor rigidez dos AR, à maior relação a/c e, conseqüentemente, à elevada porosidade do concreto. Para substituições em até 25% do AN, o módulo de elasticidade reduz pouco. Além disso, a composição variável dos AR é o principal fator que influencia nessa propriedade;
- iv) Diminui a resistência à abrasão quando se aumenta a substituição do AN pelo AMR, porém, quando se utiliza AGR como substituinte, há um aumento, o que se explica por o tamanho do AR ter grande interferência na resistência à abrasão;
- v) Aumenta a absorção de água por imersão e por capilaridade no concreto, devido a os resíduos criarem mais poros capilares longos como consequência da sua própria porosidade, além do maior número de vazios na fase da pasta na mistura do concreto;
- vi) Eleva a carbonatação e reduz a resistência à penetração de íons cloreto no concreto conforme a quantidade de resíduos aumenta, devido à maior absorção de água do AR. Porém, a adição de materiais cimentícios suplementares como substituição do cimento pode reduzir o impacto causado pelo uso de RCD referente à porosidade e sua conseqüente absorção de água.

Notam-se avanços nos estudos sobre o uso de RCD como agregado reciclado no concreto, porém, trata-se de materiais muito heterogêneos e ainda difíceis de reutilizar. Assim, o uso de AR para fabricação de materiais destinados para fins estruturais precisa ser melhor investigado, de maneira que o limite estabelecido pela NBR 15116 seja

aumentado em futuras revisões. Para isso, sugerem-se estudos sobre as propriedades mecânicas de concretos com teores de AR maiores que o máximo permitido por essa norma e sobre a aderência de barras de aço em concretos com RCD, mecanismo essencial para o desempenho e a segurança de estruturas de concreto armado.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ABERA, Y. S. A. Performance of concrete materials containing recycled aggregate from construction and demolition waste. **Results in Materials**, v. 14, 100278, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2022.100278>.

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 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

AFONSO, M. H. F.; SOUZA, J. V.; ENSSLIN, S. R.; ENSSLIN, L. Como construir conhecimento sobre o tema de pesquisa? Aplicação do processo Proknow-C na busca de literatura sobre avaliação do desenvolvimento sustentável. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 47-62, 2011. DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v5i2.424>.

ALEXANDRIDOU, C.; ANGELOPOULOS, G. N.; COUTELIERIS, F. A. Mechanical and durability performance of concrete produced with recycled aggregates from Greek construction and demolition waste plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 176, p. 745-757, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.081>.

ALVES, A. V.; VIEIRA, T. F.; BRITO, J.; CORREIA, J. R. Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 103-113, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.037>.

ANGULO, S. C.; CARRIJO, P. M.; FIGUEIREDO, A. D.; CHAVES, A. P.; JOHN, V. M. On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete. **Materials and Structures**, v. 43, p. 519-528, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9508-9>.

ANGULO, S. C.; MUELLER, A. Determination of construction and demolition recycled aggregates composition, in considering their heterogeneity. **Materials and Structures**, v. 42, n. 6, p. 739-748, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9417-3>.

BRAVO, M.; BRITO, J.; PONTES, J.; EVANGELISTA, L. Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 99, p. 59-74, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.012>.

CAPES – COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR. **Portal de Periódicos CAPES**. 2016. Disponível em: http://www.periodicos.capes.gov.br/?option=com_phome&Itemid=68&. Acesso em: 9 maio 2022.

CARTUXO, F.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L.; JIMÉNEZ, J. R.; LEDESMA, E. F. Increased durability of concrete made with fine recycled concrete aggregates using superplasticizers. **Materials**, v. 9, n. 2, 98, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma9020098>.

CASTELLOTE, M.; FERNANDEZ, L.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations. **Materials and Structures**, v. 42, n. 4, p. 515-525, 2009. DOI: <https://dx.doi.org/10.1617/s11527-008-9399-1>.

CONTRERAS, M.; TEIXEIRA, S. R.; LUCAS, M. C.; LIMA, L. C. N.; CARDOSO, D. S. L.; SILVA, G. A. C.; GREGÓRIO, G. C.; SOUZA, A. E.; SANTOS, A. Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 594-600, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.044>.

DAL MOLIN, D. C. C.; ISAIA, G. C. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. v. 1. 12 ed. São Paulo: IBRACON, 2005.

DIN – DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 4226-100**: aggregates for mortar and concrete – part 100: recycled aggregates. Berlin, 2002.

ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R.; LACERDA, R. T. D. O.; TASCA, J. E. **ProKnow-C, knowledge development process-constructivist**. Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI. Rio de Janeiro: INPI, 2010.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. M. C. L. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 1, p. 9-14, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005>.

FROTTÉ, C.; NUBILA, C. S. A. D.; NAGALLI, A.; MAZER, W.; MACIOSKI, G.; OLIVEIRA, L. O. S. Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. **Matéria**, v. 22, n. 2, e11811, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170002.0143>.

GARCÍA-GONZÁLEZ, J.; RODRÍGUEZ-ROBLES, D.; JUAN-VALDÉS, A.; MORÁN-DEL POZO, J. M.; GUERRA-ROMERO, M. I. Porosity and pore size distribution in recycled concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 67, n. 22, p. 1214-1221, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1680/macr.14.00218>.

GOMES, S. C.; ZHOU, J. L.; LI, W.; LONG, G. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: a review. **Resources, Conservation & Recycling: Michigan**, v. 145, p. 148-159, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.032>.

GRANDA, A. Índice de reciclagem no Brasil é de apenas 4%, diz Abrelpe. **Agência Brasil**, Rio de Janeiro, 5 jun. 2022. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-06/indice-de-reciclagem-no-brasil-e-de-4-diz-abrelpe>. Acesso em: 26 set. 2022.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da construção civil**: Relatório de Pesquisa. Brasília, DF: IPEA, 2012.

KAPOOR, K.; SINGH, S. P.; SINGH, B. Durability of self-compacting concrete made with recycled concrete aggregates and mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 67-76, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.026>.

KAZA, S.; YAO, L.; BHADA-TATA, P.; VAN WOERDEN, F. **What a waste 2.0**: a global snapshot of solid waste management to 2050. Washington, D.C.: World Bank Publications, 2018.

KOU, S. C.; POON, C. S.; CHAN, D. Properties of steam cured recycled aggregate fly ash concrete. *In*: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDING AND STRUCTURES, 2004, Barcelona. **Proceedings** [...]. Champs-sur-Marne: RILEM Publications SARL, 2004. p. 590-599.

KOU, S. C.; POON, C. S.; ETXEBERRIA, M. Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. **Cement and Concrete Composites**, v. 53, p. 73-82, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.06.001>.

LEDESMA, E. F.; JIMENEZ, J. R.; AYUSO, J.; FERNANDEZ, J. M.; BRITO, J. Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production - Part-I: ceramic masonry waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, p. 692-706, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.084>.

LIMBACHIYA, M.; MEDDAH, M. S.; OUCHAGOUR, Y. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 439-449, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.023>.

MALTA, J. O.; SILVA, V. S.; GONÇALVES, J. P. Argamassa contendo agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, v. 1, n. 2, p. 176-188, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/7214>. Acesso em: 26 set. 2022.

MARIE, I.; QUIASRAWI, H. Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 37, p. 243-248, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.020>.

MARTÍNEZ, P. S.; CORTINA, M. G.; MARTÍNEZ, F. F.; SANCHEZ, A. R. Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication. **Journal of Cleaner Production**, v. 118, p. 162-169, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.059>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008.

PELISSARI, V.; MATOSKI, A.; ALBERTI, M. E.; MEDEIROS, A. Absorção de água de amassamento em concretos produzidos com agregados reciclados. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 1, p. 51-69, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.34115/basrv4n1-005>.

PEREIRA, P.; EVANGELISTA, L.; BRITO, J. The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 722-729, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.050>.

RODRIGUES, F.; CARVALHO, M. T.; EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Physical-chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 52, p. 438-445, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.023>.

ROSADO, L. P. **Avaliação do ciclo de vida de alternativas para o gerenciamento integrado de resíduos da construção civil do município de Limeira/SP, Brasil**. 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2015. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/Acervo/Detalhe/949162>. Acesso em: 9 out. 2022.

SALES, A.; SOUZA, F. R. Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 6, p. 2362-2370, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.11.001>.

SHARMA, J.; SINGLA, S. Influence of recycled concrete aggregates on strength parameters of concrete. **SSRG International Journal of Civil Engineering**, v. 1, n. 4, p. 20-24, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V1I4P104>.

SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 598-614, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.070>.

SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 400-415, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.171>.

SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 201-217, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>.

SOUZA, C. A. **Utilização de resíduo de concreto como agregado miúdo para argamassa de concretos estruturais convencionais**. 2006. Dissertação (Mestrado

em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/ISMS-796NWX>. Acesso em: 9 out. 2022.

WAGIH, A. M.; EL-KARMOTY, H. Z.; EBID, M.; OKBA, S. H. Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. **Housing and Building National Research Center Journal**, v. 9, n. 3, p. 193-200, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hbrej.2013.08.007>.

WERLE, A. P.; KAZMIERCZAK, C. S.; KULAKOWSKI, M. P. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 2, p. 213-228, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212011000200015>.

YEHEYIS, M.; HEWAGE, K.; ALAM, M. S.; ESKICIOGLU, C.; SADIQ, R. An overview of construction and demolition waste management in Canada: a lifecycle analysis approach to sustainability. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 15, n. 1, p. 81-91, 2013 DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-012-0481-6>.

ZHANG, C.; HU, M.; DI MAIO, F.; SPRECHER, B.; YANG, X.; TUKKER, A. An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. **Science of the Total Environment**, v. 803, 149892, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149892>.