**UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS DE RCD EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS:
PANORAMA ATUAL**

Mayara Turi Gerin (*), Izabella Sant'Ana Storch, Fernando Menezes de Almeida Filho, Silvana De Nardin

*Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, mayaragerin@gmail.com

RESUMO

Atualmente as diretrizes brasileiras que tratam da reciclagem dos resíduos de construção e demolição (RCD) os destinam apenas às obras de pavimentação e ao preparo de concreto sem função estrutural. Apesar da ausência de normas para a utilização do RCD como agregados reciclados no concreto com função estrutural, atualmente são encontrados na literatura diversos estudos que colaboram com a possibilidade de desenvolvimento de uma primeira norma. A fim de demonstrar os avanços da tecnologia de aplicação do agregado de RCD em concreto estrutural, neste trabalho alguns desses estudos serão apresentados. Dessa forma, resultados de diversos estudos divulgados nos últimos anos e que tratam da produção de concretos utilizando RCD com função estrutural (autoadensáveis e comuns) e sua aplicação a elementos estruturais como vigas, lajes, pilares e alvenaria estrutural. Para cada estudo específico são identificados os teores de substituição dos agregados naturais por agregados de RCD, o tipo de agregado de RCD utilizado e os seus efeitos sobre parâmetros como trabalhabilidade, resistência a compressão, à tração e módulo de elasticidade, bem como as necessidades específicas a cada tipo de utilização. Este artigo, portanto, colabora com a divulgação desses avanços científicos na utilização do concreto de agregados de RCD.

PALAVRAS-CHAVE: Agregados de RCD, RCD, concreto de RCD, concreto reciclado, concreto estrutural.

ABSTRACT

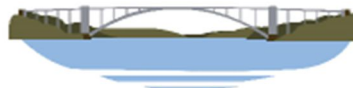
Currently the Brazilian standardizations that deal with the recycling of construction and demolition waste are intended only for paving works and the preparation of concrete without structural function. Despite the absence of standards for the use of construction waste as recycled aggregates in concrete with structural function, several studies are currently found in the literature that collaborate with the possibility of developing a first standard. In order to demonstrate the advances in construction waste aggregate application technology in structural concrete, in this work some of these studies will be presented. Thus, results of several studies published in recent years dealing with the production of concrete using construction waste with structural function (self-compacting concrete and common) and its application to structural elements such as beams, slabs, pillars and structural masonry. For each specific study the contents of natural aggregates by construction waste aggregates, the type of construction waste aggregate used and their effects on parameters such as workability, compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity, as well as the specific needs are identified for each type of use. This article, therefore, collaborates with the dissemination of these scientific advances in the use of concrete of construction waste aggregates.

KEY WORDS: Recycled Aggregates, Construction Waste, Recycled concrete, Structural Concrete

INTRODUÇÃO

No Brasil, a Resolução nº 307 do CONAMA (2002) estabelece a classificação dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Classes A, B, C e D, onde os resíduos de Classe A são aqueles que podem ser reutilizáveis ou recicláveis como agregados. No entanto, as diretrizes brasileiras para a utilização desses resíduos de classe A como agregados reciclados são apresentadas apenas nas normas ABNT NBR 15115:2004 e ABNT NBR 15116:2004 destinando-os às obras de pavimentação e ao preparo de concreto sem função estrutural. Apesar da ausência de normas para a utilização do RCD como agregados reciclados no concreto com função estrutural, atualmente são encontrados na literatura diversos estudos que colaboram com a possibilidade de desenvolvimento de uma primeira norma.

O concreto com agregados de resíduos de construção e demolição é caracterizado pela substituição total ou parcial dos agregados naturais por agregados reciclados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Sabe-se que algumas características do concreto são modificadas pelo uso de agregados reciclados, sobretudo as propriedades de resistência mecânica, absorção de água, porosidade e permeabilidade; retração por secagem; módulo de elasticidade, fluência e massa específica. A intensidade que essas características são modificadas dependem do tipo de agregado reciclado (AR) utilizado, absorção, granulometria, teor de substituição de agregados naturais por reciclados, método de produção do



concreto, entre outros. Dessa forma, nos últimos anos muitas pesquisas foram realizadas para desenvolver adequadamente essa aplicação do RCD garantindo a segurança das estruturas (ANGULO, 2000).

OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é apresentar, de forma sucinta, os avanços científicos e tecnológicos recentes no tocante à utilização do agregado de RCD em concreto estrutural, com vistas a contribuir com mecanismos de divulgação desses avanços. Além disso, também será feita uma análise do efeito da substituição dos agregados naturais por agregados reciclados nas propriedades mais importantes para cada tipo de destinação do concreto reciclado.

METODOLOGIA

Esse artigo busca retratar o atual estado do conhecimento científico acerca do uso de agregados oriundos de resíduos de construção e demolição (RCD). Assim sendo, esse documento reúne resultados de diversos estudos realizados nas duas últimas décadas e que tratam da produção de concretos utilizando RCD com função estrutural (autoadensáveis e comuns) e sua aplicação a elementos estruturais como vigas, lajes, pilares e alvenaria estrutural. Para cada estudo específico são identificados os teores de substituição dos agregados naturais por agregados de RCD, o tipo de agregado de RCD utilizado e os seus efeitos sobre parâmetros como trabalhabilidade, resistência a compressão, à tração e módulo de elasticidade, bem como as necessidades específicas a cada tipo de utilização.

CONCRETO DE RCD COM FUNÇÃO ESTRUTURAL

Diferentemente das propriedades dos agregados naturais, os agregados de RCD apresentam propriedades específicas que determinam algumas diferenças nas condições de aplicação e nas características dos concretos resultantes. Segundo Angulo (2000) os agregados reciclados de RCD são mais irregulares, angulares e de textura mais áspera que os agregados naturais. Quanto à massa específica, sabe-se que é menor que a dos agregados naturais, porém, Kuster Junior (2018) indica que há grande divergência entre os autores sobre o percentual de redução, pois há variabilidade de materiais e composições no agregado reciclado de RCD. Angulo (2000), a respeito da absorção de água do agregado de RCD, afirma que é maior que a dos agregados naturais, e esse é um fator importante pois influencia no estado fresco dos concretos causando variação, alterações na relação água/cimento (a/c) e podendo influenciar em características do estado endurecido como a resistência a compressão.

Dentre os estudos que tratam da utilização de RCD para produção de concreto estrutural há variação na adoção de parâmetros como teor de substituição do agregado natural pelo agregado de resíduo de concreto, origem e características do concreto antigo. Esses parâmetros afetam a trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, durabilidade e propriedades físicas.

No caso do concreto autoadensável (CAA), as principais características que diferenciam esse concreto dos demais referem-se ao seu estado fresco, pois trata-se de um concreto de alta fluidez, capacidade de preencher vazios sem a necessidade de adensamento mecânico, ótima trabalhabilidade, coesão e alta habilidade de passagem (OKAMURA, 1997). Dessa forma, os pesquisadores dedicam grande atenção para a essas características já que a incorporação do agregado de RCD as influencia. Na Tabela 1 é apresentada uma sinopse de pesquisas recentes a respeito da utilização de agregado de resíduos no concreto autoadensável; nessa tabela nota-se grande variabilidade nos teores de substituição de agregados naturais por agregados reciclados.

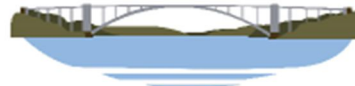


Tabela 1. Sinopse de pesquisas relacionadas ao CAA e agregado reciclado. Fonte: Autores do Trabalho.

Origem do agregado reciclado	Porcentagens de substituição de agregados	Principais conclusões	Referência
Agregado graúdo e miúdo de resíduos de concreto	0 e 100%	De acordo com os resultados, a ruptura ocorreu nos agregados reciclados demonstrando se o ponto fraco da matriz do concreto. CAA com AR graúdo e miúdo apresentou resultados piores comparados àqueles com agregado graúdo ou miúdo. Os autores não apresentam resultados para o estado fresco.	Gesoglu et al. (2015)
Agregado graúdo de resíduos de concreto	0, 50 e 100%	A substituição dos agregados naturais pelos reciclados gerou perda na durabilidade. As adições foram benéficas para o estado endurecido para a substituição de até 50% dos agregados naturais, porém, para 100% de substituição as adições não foram eficazes. Houve maior necessidade de superplastificante para manter as características no estado fresco desejáveis.	Kapoor et al. (2016)
Agregado graúdo de resíduos de concreto	0, 25, 50, 75 e 100%	Com o aumento do nível de substituição do agregado natural pelo AR, houve redução na resistência à carbonatação, a profundidade de carbonatação aumentou em até 58%. O efeito é o mesmo em relação à resistividade elétrica, que reduziu em até 48%.	Singh (2016)
Agregado graúdo de resíduos de concreto	0, 20, 50 e 100%	A especificidade do CAA com AR reside na quantidade de água extra necessária para absorção dos agregados reciclados na mistura. A reologia do CAA é alterada pela utilização de agregados reciclados, principalmente em concretos com baixa relação a/c.	González-Taboada et al. (2017)
Agregado graúdo reciclado de resíduos de RCD	0, 25 e 40%	Os concretos produzidos com agregados reciclados obtiveram bons resultados no estado fresco e mecânicos. Houve maior necessidade de superplastificante em concretos com AR. A fluência é mais afetada pela presença de agregados reciclados que a retração.	Manzi et al., 2017
Agregado graúdo de resíduos de elementos pré-moldados	0 e 100%	Em concretos com AR houve queda da densidade do concreto de 1-3%, maior absorção de água (entre 10,4-16,9%) e menor módulo de elasticidade (entre 11,2-17,2%). A resistência à compressão aumentou entre 7,7-13,8%. Os agregados reciclados advindos de pré-moldados apresentaram-se de alta qualidade gerando concretos com melhor desempenho que aqueles concretos com AR de usinas recicladoras de RCD.	Salesa et al., 2017
Agregado graúdo de resíduos de RCD	Agregado graúdo: 0, 30, 50 e 100%. Agregado miúdo: 0, 30 e 50%.	Realizar pré-molhagem dos agregados ajuda a reduzir a queda na fluidez e trabalhabilidade do CAA com AR. Houve necessidade de utilizar maior quantidade de superplastificante. A resistências à compressão dos concretos foram próximas, bem como a resistência à tração, houve perda no módulo de elasticidade com acréscimo do uso de AR que teve variação de 3,4-24,3%, a absorção de água também aumentou, a uma variação entre 17,4 e 56,5%.	Kuster Junior, 2018

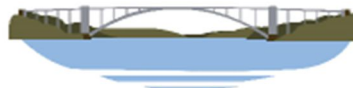


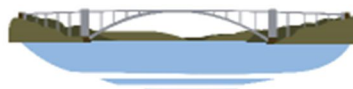
Tabela 2. Sinopse de pesquisas relacionadas ao CAA e agregado reciclado. Fonte: Autores do Trabalho.

Origem do agregado reciclado	Porcentagens de substituição de agregados	Principais conclusões	Referência
Agregado graúdo de resíduos de concreto	Agregado graúdo: 0, 25, 50, 75 e 100%. Agregado miúdo: 0, 50 e 100%.	Com o aumento do de AR na dosagem, reduz-se a resistividade elétrica do concreto. As misturas com nível de baixo a intermediário de AR não tiveram alterações negativas significativas em seu desempenho geral.	Singh, 2018
Agregado graúdo de resíduos de RCD	0, 20, 40, 60 e 100%	A fluidez, trabalhabilidade e habilidade de passagem reduziram com a utilização de agregados reciclados, a utilização de sílica ativa diminui esses efeitos, e melhora a zona de transição entre a pasta e o AR.	Rajhans et al., 2018
Agregados graúdos de resíduos de elementos pré-moldados	0, 20, 50 e 100%	O espalhamento diminuiu com o aumento de AR na dosagem em cerca de 11,4-23,5%, e o tempo T ₅₀₀ (abertura de 500 mm de espalhamento) aumentou a uma variação de 20-57%, mesmo com o aumento de superplastificante na dosagem. A resistividade elétrica de concretos com AR diminuiu certa de 2-5% em relação ao concreto de referência. O módulo de elasticidade sofre redução que variou entre 3,5-10,6%. A resistência à compressão aumentou em cerca de 1,7-17,3%, o que pode ser explicado pela alta qualidade do agregado reciclado de elemento pré-moldado.	Fiol et al., (2018)

Gesoglu et al. (2015) investigaram as mudanças nas principais propriedades mecânicas de concretos com substituição de 100% de agregado graúdo (AG) e/ou 100% de agregado miúdo (AM), para realizar a investigação experimental utilizou duas relação a/c de 0,3 e 0,43. A redução na resistência à compressão para os concretos com AG, AM ou AG+AM variaram entre 11,8-16,9%, 15,8-26,9% e 27,0-30,9% respectivamente. Se tratando do módulo de elasticidade, para a relação a/c 0,3, houve redução de 22,6%, 31,4% e 49,4% para concretos com 100% de substituição de AG, 100% de substituição de AM e 100% de substituição de ambos agregados, respectivamente. Em relação à resistência à tração na flexão, os resultados foram 21,4%, 34,9% e 56,3% menores para concretos com 100% de substituição de AG, 100% de substituição de AM e 100% de substituição de ambos agregados respectivamente. Entre as possíveis explicações para as reduções, está a menor resistência do concreto utilizado nos agregados reciclados indicado pela ruptura do concreto passando por estes agregados, ligação mais fraca na zona de transição pela porosidade do AR, e menor densidade dos AR, os autores não apresentaram resultados para o estado fresco dos concretos. As pesquisas dos autores Salesa *et al.* (2017), Kuster Junior (2018) e Fiol *et al.* (2018) também apresentaram resultados com redução nas resistências mecânicas principais.

Rajhans et al. (2018) avaliaram o desempenho no estado fresco de CAA com agregado graúdo reciclado e adição de sílica ativa, a resistência à compressão e durabilidade. Para o estado fresco, em relação ao T₅₀₀, houve aumento no tempo de abertura dos concretos que variou de 12,5-50%, a depender do teor de substituição do AG natural pelo AG reciclado e teor de sílica ativa (2, 4, 6, e 8%). A redução no espalhamento (mm) variou entre 1-9,5%. O tempo no funil-V (s) reduziu a uma variação de 8,3-26,4%. Para os três ensaios o concreto que apresentou piores resultados foi o com 100% de substituição do AG com 8% de sílica ativa. Ressalta-se que foi utilizado mesmo teor de superplastificante em todos os concretos, e que apesar da perda de fluidez e trabalhabilidade, os concretos estão dentro dos limites normativos. Em relação ao estado fresco, o CAA é prejudicado quando tem AR em sua composição, principalmente pelo fato desses apresentarem maior porosidade, um fator que pode melhorar este aspecto é a pré-molhagem dos agregados reciclados. Outra forma de contornar o problema é a utilização de maior quantidade de superplastificante na mistura (KAPOOR *et al.*, 2016; GONZÁLEZ-TABOADA *et al.*, 2017; MANZI *et al.*, 2017; KUSTER JUNIOR, 2018; FIOLE *et al.*, 2018).

Ainda de acordo com os resultados de Rajhans et al. (2018a), para resistência à compressão aos 28 dias apresentaram variação entre 6,5-46,7%, a depender do teor de AG na dosagem do concreto. Em relação à durabilidade, a profundidade de carbonatação aumentou com o aumento de AG na mistura a uma variação de 3,8-16,7%. A penetração de água aumentou a uma variação de 4,7-14,6%. A retração por secagem aumentou a uma variação de 10-37,9%. Os aspectos que interferem na durabilidade de concretos com AGR em sua dosagem estão relacionados à argamassa antiga aderida ao AG, pois, apresenta-se mais porosa, como microfissuras e vazios. Ainda sobre durabilidade, as pesquisas de Kapoor et al. (2016), Singh (2016), Salesa et al.



(2017), Kuster Junior (2018), Singh (2018), Fiol et al. (2018) também apresentam redução de durabilidade em concretos com agregado reciclado.

Se tratando da origem dos agregados reciclados utilizados nas dosagens dos concretos; têm-se, além do resíduo de construção e demolição, muitas pesquisas utilizando agregados reciclados de concreto; o uso de agregados oriundos predominantemente de resíduos de concreto, a variabilidade desses agregados, e dentre esses agregados reciclados de concreto, existem aqueles advindos de elementos pré-moldados como os investigados por Salesa et al. (2017) e Fiol et al., (2018). Ambos os estudos mostraram que o agregado vindo de elementos pré-moldados é um agregado de ótima qualidade; tendo em vista a maior resistência desses concretos e o maior controle de qualidade na produção dos elementos pré-fabricados.

Pesquisas que tratem da utilização do AR em concretos para fins estruturais têm se intensificado nos últimos anos e o conhecimento científico gerado é de grande valia para a utilização cada vez maior desses concretos, principalmente para garantir a segurança e a durabilidade das estruturas. Observa-se que, em geral, a utilização de agregados de RCD traz redução nas propriedades mecânicas e físicas dos concretos, porém, algumas pesquisas determinam limites de utilização desses agregados de RCD em concretos para fins estruturais. Com esses limites de utilização claramente definidos, mesmo que a utilização do AR afete as propriedades do concreto, estas apresentam-se dentro de intervalos de valores estipulados por normas técnicas a fim de garantir segurança, estabilidade e durabilidade das estruturas.

USO DE RCD EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Com o desenvolvimento do concreto com agregados de RCD, também é crescente o número de estudos a respeito da aplicação deste tipo de concreto diretamente em elementos estruturais. Neste item são apresentadas investigações da utilização deste tipo de concreto em blocos estruturais, estruturas de concreto armado e estruturas mistas.

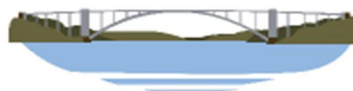
Em blocos de concreto, apresentados na Figura 1, o agregado de RCD foi incorporado em traços de concreto com abatimento nulo. Além dos cuidados com as propriedades mecânicas do concreto e do bloco de concreto, há uma preocupação desses estudos com a absorção de água dos blocos devido a maior porosidade deste tipo de resíduo se comparado ao agregado natural. Em um desses estudos, Lintz et al (2012) obtiveram resultados dos ensaios de resistência à compressão dos blocos que comprovam a viabilidade técnica do produto para utilização como elemento de alvenaria dentro do setor da construção civil. Nesse estudo, os autores substituíram os agregados miúdos e graúdos naturais por agregados de resíduos de concretos e argamassas de mesma granulometria. Os teores de substituição adotados foram 0, 20, 50, 80 e 100%. Em relação à absorção de água dos blocos de concreto, o aumento do teor de substituição de agregados naturais por agregados de RCD influencia no aumento da absorção, mas ambas atenderam os limites da norma brasileira para todas as dosagens estudadas (LINTZ et al., 2012).



Figura 1: Blocos estruturais de concreto de RCD. Fonte: Lintz et al. (2012)

Sabendo que as características físicas dos AR afetam as propriedades mecânicas dos blocos de alvenaria estrutural, Soutsos et al. (2011) determinou níveis de substituição de agregados naturais por agregados de RCD para que não houvesse diminuição significativa sobre a resistência à compressão. Ensaios experimentais mostraram que, para os teores de substituição utilizados, não houve redução significativa na resistência do bloco para um dado teor de cimento. Dessa forma, não foi necessário aumentar a quantidade de cimento, que poderia influenciar no aumento do custo do bloco de concreto (SOUTSOS et al., 2011).

Wang et al. (2011) ensaiaram três lajes treliçadas com concreto reciclado e carregamento de longa duração. O resíduo utilizado como agregado graúdo foi obtido a partir da estrutura de concreto com 30 MPa de um edifício demolido após 19 anos construído. As três lajes se diferenciavam entre si apenas no que se refere ao teor de substituição do agregado natural por agregados de resíduos, com 0, 50 e 100%. De acordo com os ensaios de caracterização do concreto no estado fresco e endurecido, a substituição dos agregados naturais por reciclados teve maior influência no módulo de elasticidade e retração. O módulo de elasticidade aos 28 dias sofreu uma redução de cerca de 25% com o teor de substituição de 100%. Em relação à retração, houve



um aumento de 41,5% da sua medida com a substituição de 100% dos agregados graúdos naturais por graúdos reciclados. Ensaio mostraram que a trabalhabilidade e resistência à compressão apresentaram-se semelhantes para todas as substituições. Os autores justificam a menor influência nessas propriedades devido à alta qualidade dos resíduos utilizados, obtidos apenas de resíduos de concreto. As lajes com 12 cm de altura foram simplesmente apoiadas e a deflexão foi verificada por cinco meses. Na idade de 139 dias, a deflexão média foi de 8,78 mm para aquelas com 100% de substituição, que foi cerca de 14,5% e 35,5% maior que as medidas nas amostras preparadas com 50% e 0%. Isso foi causado principalmente pela maior retração e menor módulo de elasticidade obtido no uso de resíduos. Além das lajes treliçadas, (WANG et al., 2011) também ensaiaram quatro lajes mistas com “steel deck” e concreto com 100% de substituição, submetidas a carregamento de longa duração. Dentre as quatro lajes, duas tinham 12 cm de altura e as outras duas tinham 18 cm. As lajes foram simplesmente apoiadas e a deflexão foi verificada por cinco meses. Resultados experimentais mostraram que a laje de 12 cm de altura obteve 64% da deflexão causada pelo efeito de retração. Enquanto a laje com 18 cm de espessura obteve 59,9% da deflexão causada por retração.

Outra possibilidade de utilização de agregados reciclados é o pilar misto preenchido com concreto de agregados de resíduos de concreto (PPCARC), apresentado na Figura 2. Sua composição se dá por um perfil de aço com seção transversal tubular (quadrada, retangular ou circular) preenchido com concreto estrutural com substituição dos agregados naturais por agregados de resíduos de concreto. Vale ressaltar que os estudos que envolvem este tipo de elemento estrutural utilizam apenas os agregados resíduos de concreto em substituição do agregado natural na composição do concreto reciclado.

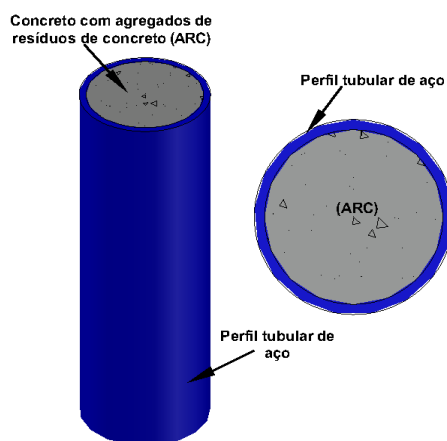
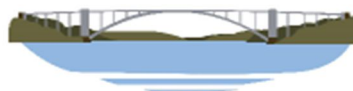


Figura 2: Pilar misto preenchido com concreto de resíduos de concreto (PPCARC). Fonte: Autores do Trabalho

O PPCARC foi estudado pela primeira vez por Konno et al apud Tam et al. (2014). No referido estudo foram realizados ensaios de pilares preenchidos submetidos a compressão axial considerando concreto com substituição total dos agregados naturais por agregados reciclados. Apesar dos valores de resistência ainda serem inferiores aos de pilares preenchidos com concretos convencionais (de agregados naturais), foi observado que o efeito de confinamento proporcionado pelo tubo de aço gerou aumento na rigidez e na resistência do concreto reciclado. Após esse primeiro estudo, uma série de outros pesquisadores verificaram que a presença do tubo de aço envolvendo o núcleo de concreto melhora as características frágeis do concreto por conta do efeito de confinamento.

Yang e Han (2006) realizaram ensaios de compressão axial centrada e excêntrica em pilares mistos preenchidos com concreto de agregado reciclado. Em termos de capacidade resistente foi observado que as substituições de 25% e 50% de agregado natural por agregados de resíduos de concreto resultaram em reduções de 1,7% e 9,1% em relação aos exemplares com agregados naturais. Além de avaliar a influência do tipo de agregado (natural ou de resíduos) no comportamento do pilar preenchido, também foi analisada a influência de parâmetros como a forma da seção transversal (circular e quadrada) e a excentricidade do carregamento. Os resultados mostraram que embora o pilar preenchido com resíduos apresente leve redução de capacidade resistente em relação ao pilar com agregados naturais, o comportamento de ambos é similar e a falha foi caracterizada, predominantemente pela instabilidade por flexão. Assim como observado nos exemplares preenchidos com agregados naturais, naqueles preenchidos com agregados de resíduos também houve redução da capacidade resistente em função do aumento da excentricidade da força axial.

O comportamento do pilar preenchido com agregado de RCD também foi analisado por Xiao et al.(2012) com destaque para o comportamento do concreto confinado. Para isso, diversos exemplares de pilar preenchido com concreto de RCD sob compressão centrada foram ensaiados variando o teor de substituição de agregados graúdos naturais por agregados de RCD. Foi constatado que tanto a resistência quanto a deformabilidade do concreto de agregados de RCD são melhoradas pelo efeito de confinamento. Assim como ocorre com o concreto de agregados naturais, naqueles com agregados de RCD também foi observado aumento da força resistida pelo concreto em função do aumento da resistência do concreto de agregado reciclado.



Em Chen et al (2017), a substituição de agregados naturais por reciclados geraram redução de 4,5 e 11,2% na capacidade resistente dos pilares preenchidos submetidos à compressão excêntrica com 2 cm e 4 cm, respectivamente. Essa substituição teve um efeito maior na resistência à compressão do concreto, que sofreu redução de 13,6%. Nesses estudos é possível verificar que a substituição de agregados naturais por reciclados exerce maior influência na resistência à compressão do concreto do que na capacidade resistente dos pilares. Esse efeito é explicado pela presença do tubo de aço envolvendo o núcleo de concreto reciclado que melhora as características frágeis do concreto por conta do efeito de confinamento.

Posteriormente, Mohanraj et al (2011) realizou um conjunto de ensaios experimentais com o objetivo de avaliar a influência da forma da seção transversal (circular e quadrada), da relação lado/espessura e do efeito de confinamento no núcleo de concreto no comportamento e capacidade resistente de pilares preenchidos com concretos de agregados naturais e com substituição de 25% dos agregados graúdos por agregados graúdos de RCD. Para isso, foram ensaiados 4 pilares de aço, 4 pilares preenchidos de concreto com agregados naturais e 4 pilares preenchidos de concreto com agregados de RCD. Os resultados experimentais mostraram leve aumento da capacidade resistente dos pilares com concreto de RCD em relação aos pilares com agregados naturais. O aumento da capacidade resistente com o aumento do teor de substituição também foi observado por Niu et al (2015). Através de ensaios experimentais de pilares com 100% de substituição de agregados naturais por reciclados, os autores verificaram a diminuição no módulo de elasticidade de 11,6% e aumento de 0,8% na resistência à compressão, gerando aumento na capacidade resistente à compressão axial de 3,13% para pilares de seção transversal quadrada e 6,06% em pilares de seção transversal circular. Esse aumento na capacidade resistente é justificado por Chen *et al.* (2016) pela ausência do procedimento de pré-molhagem, utilizado por muitas pesquisas para a melhoria da trabalhabilidade. O aumento no conteúdo de resíduos, caracterizados por alta absorção de água levam à redução de água na mistura e, portanto, um menor fator água/cimento é responsável pelo aumento na resistência à compressão do concreto que leva a uma capacidade resistente também mais alta para o PPCARC.

A partir de resultados experimentais encontrados na literatura, Yang (2011) desenvolveu um modelo teórico representativo do comportamento e da capacidade resistente de pilares preenchidos com agregados de RCD (PPCARC) leva em conta os efeitos de longa duração. O referido estudo mostrou que o aumento da porcentagem de agregados de RCD resulta em concretos mais deformáveis e mais susceptíveis aos efeitos de retração; esse conjunto de fatores ocasionou em redução da capacidade resistente (YANG, 2011). Yang (2015) simulou pilares de seções transversais quadradas e circulares submetidos à compressão axial e carregamento cíclico de flexão e verificou que os parâmetros que mais exercem influência no comportamento destes pilares sob carga cíclica são: resistência ao escoamento do aço, esbelteza, nível de carga axial e razão entre área de aço e área de concreto.

A ideia de melhoria das propriedades do concreto por meio do efeito de confinamento também foi explorada no estudo dos elementos mistos de aço e concreto armado (Figura 3). Trata-se de um tipo de elemento misto (pilar ou viga) em que o perfil de aço é revestido com concreto armado (XU et al., 2017). As principais vantagens da utilização desse tipo de elemento são relacionadas ao seu comportamento sob ações sísmicas. Os estudos envolveram a verificação do teor de substituição de agregados naturais por agregados de resíduo de concreto na aderência entre os materiais, no comportamento dos elementos submetidos a compressão axial, flexão, cisalhamento e carregamentos cíclicos.

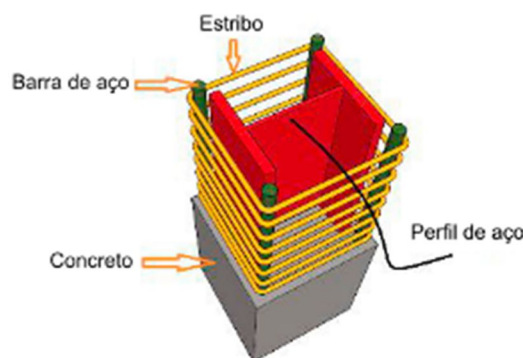
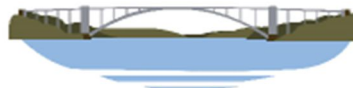


Figura 3: Pilar misto revestido. Fonte: Xu et al. (2017)

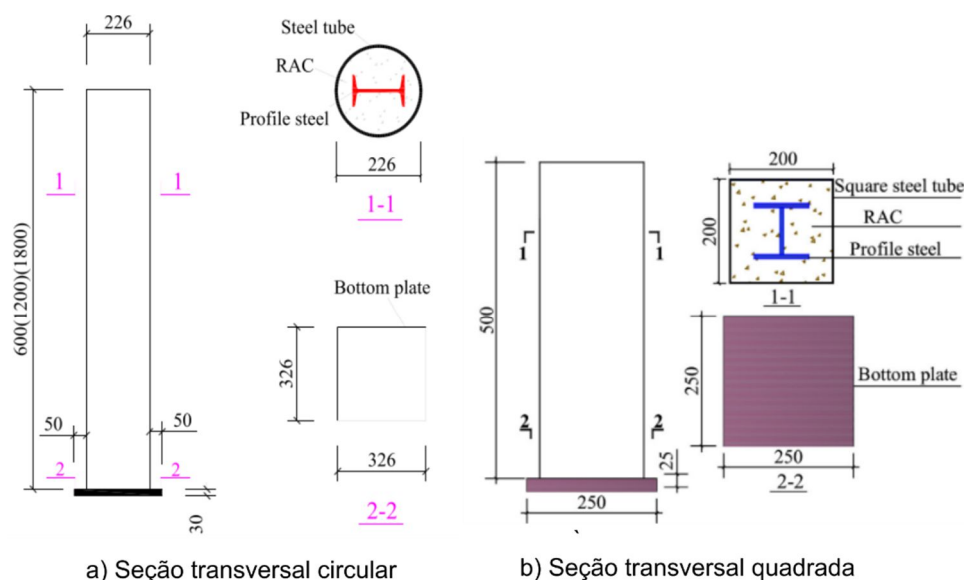
Segundo Xu et al (2017), a força resistente dos pilares aumenta conforme se aumenta a resistência à compressão do concreto, no entanto, a ductilidade dos pilares diminui quando o teor de substituição aumenta. Os autores justificam esses efeitos pela alta capacidade de absorção de água e da fragilidade dos agregados.

Chen et al (2014) e Zheng et al (2016) estudaram a aderência entre o perfil de aço revestido e o concreto com agregados de resíduos. Para isso foram realizados ensaios “push-out”. Ambos os trabalhos variaram o teor de substituição do agregado natural pelo agregado de resíduo em 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100%. Os agregados de resíduo utilizados foram obtidos pela



demolição de uma estrutura de concreto armado com 50 anos e classe de resistência C30. Os autores verificaram que o aumento do teor de substituição influenciou positivamente na aderência do concreto, assim como a resistência à compressão.

Considerando as vantagens do pilar preenchido e o pilar misto revestido de concreto armado com agregados de resíduos, Ma et al (2018) e Ma et al (2019) combinaram as vantagens dos dois elementos estruturais dando origem a uma nova composição de pilar conforme apresentado na Figura 4. Nesse novo elemento, o perfil tubular de aço (circular ou quadrado) é preenchido com concreto de agregados de resíduos de concreto e ainda possui um perfil de aço de seção I no interior, revestido pelo concreto. Ma et al (2018) estudou pilares com perfil tubular de seção circular, onde seus objetivos eram verificar a influência do teor de substituição do agregado natural pelo reciclado, da esbeltez local do perfil tubular e das dimensões do perfil I na capacidade resistente do pilar. No estudo de Ma et al (2019) foi avaliada a influência do teor de substituição, a resistência à compressão do concreto, a esbeltez local do perfil tubular e as dimensões do perfil I na capacidade resistente dos pilares. Ambos os autores utilizaram os teores de substituição do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo de resíduo de concreto em 0, 30, 50, 70 e 100%. Também foram verificadas por ambos artigos reduções na resistência à compressão e no módulo de elasticidade do concreto com o aumento do teor de substituição, que consequentemente geraram redução na capacidade resistente dos pilares.



a) Seção transversal circular

b) Seção transversal quadrada

Fonte: Ma et al (2018)

Fonte: Ma et al (2019)

Figura 4. Pilares mistos preenchidos com concreto reciclado e perfil de aço revestido. Fontes: Ma et al (2018) e Ma et al (2019)

CONCLUSÕES

A partir do panorama atual apresentado neste artigo é possível identificar os parâmetros mais comumente adotados nos estudos com agregados de resíduos de concreto, a saber: teores de substituição dos agregados naturais por agregados de RCD e o tipo de agregado de RCD utilizado. Além disso, foram indicados os efeitos dessa substituição sobre as propriedades físicas e mecânicas do concreto, conforme a necessidade de cada tipo de elemento estrutural. No estudo de concreto autoadensável, a pré-molhagem dos agregados é um procedimento recomendado para garantir a trabalhabilidade necessária; para esse mesmo efeito também é indicada a utilização de aditivo superplastificante. Algumas pesquisas voltadas para o concreto autoadensável também indicam um limite do teor de substituição de agregados naturais por reciclados a fim de reduzir a influência dessa substituição nas propriedades mecânicas e físicas do concreto. Esse limite no teor de substituição também é indicado em pesquisas que investigam a utilização de RCD em blocos de alvenaria, visando garantir boas propriedades mecânicas do bloco e absorção de água dentro de limites pré-estabelecidos. Ao contrário do que se observa no estudo de concreto autoadensável, na aplicação dos agregados de resíduos de concreto para produção de concreto comum, ou seja, concretos que não necessitam de alta trabalhabilidade e adensabilidade, alguns autores sugerem que a não realização da pré-molhagem já que esse procedimento diminui a resistência à compressão do concreto. Dessa forma, é possível perceber que as diretrizes para reciclagem de agregados de RCD não podem ser tratadas de forma generalizada; pois dependem do tipo de aplicação do concreto reciclado resultante. No entanto, com o desenvolvimento da tecnologia de reciclagem de agregados, a aplicação estrutural é possível em diferentes elementos estruturais.

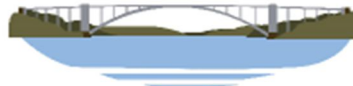


AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio na forma de bolsa de mestrado e doutorado para realização deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AJDUKIEWICZ, A. B.; KLISZCZEWICZ, A. T. Comparative Tests of Beams and Columns Made of Recycled Aggregate Concrete and Natural Aggregate Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 5, n. 2, p. 259–273, 2007.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115**. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos, 2004a.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos, 2004b.
4. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 307, 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em 21 de nov. 2018.
5. CHEN, Z.; XU, J.; LIANG, Y.; SU, Y. Bond behaviors of shape steel embedded in recycled aggregate concrete and recycled aggregate concrete filled in steel tubes. **Steel and Composite Structures**, v. 17, p. 929-949, 2014.
6. CHEN, Z. et al. Recycling and reuse of construction and demolition waste in concrete-filled steel tubes: A review. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 641–660, 2016.
7. CHEN, J. et al. Behavior of normal-strength recycled aggregate concrete filled steel tubes under combined loading. **Engineering Structures**, v. 130, p. 23–40, 2017.
8. FIOL, F. THOMAS, C.; MUÑOZ, C.; ORTEGA-LÓPEZ, V.; MANSO, J. M. The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 182, p. 309-323, 2018.
9. GESOGLU, M; GUNEYISI, E; OZ, H. O; TAHA, I; YASEMIN, M. T. Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled aggregates. **Construction and building materials**, v. 98, p. 334-344, 2015.
10. GONZÁLEZ-TABOADA, I; GONZÁLES-FONTEBOA, B; MARTINEZ-ABELLA, F; SEARA-PAZ, S. Analysis of rheological behavior of self-compacting concrete made with recycled aggregates. **Construction and building materials**, v. 157, p. 18-25, 2017.
11. GUNEYISI, E; GESOGLU, M; ALGIN, Z; YAZICI, H. Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates. **Construction and building materials**, v. 113, p. 622-630, 2016.
12. 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.
13. KUSTER JUNIOR, J.S. **Avaliação da incorporação de agregado reciclado na composição de concretos autoadensáveis**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.
14. LINTZ, R. C. C.; JACINTHO, A. E. P. G. A.; PIMENTEL, L. L.; GACHET-BARBOSA, L. A. Estudo do reaproveitamento de resíduos de construção em concretos empregados na fabricação de blocos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 2, p. 166–181, 2012.
15. MA, H. et al. Compressive behaviour of composite columns composed of RAC-filled circular steel tube and profile steel under axial loading. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 143, p. 72–82, 2018.
16. MA, H. et al. Axial compression performance of composite short columns composed of RAC-filled square steel tube and profile steel. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 153, p. 416–430, 2019.
17. MANZI, S; MAZZOTTI, C; BIGOZZI, M. C. Self-compacting concrete with recycled concrete aggregate: Study of the long-term properties. **Construction and building materials**, v. 157, p. 584-590, 2017.
18. MOHANRAJ, E. K.; KANDASAMY, S.; MALATHY, R. Behaviour of steel tubular stub and slender columns filled with concrete using recycled aggregates. **Journal of the South African Institution of Civil Engineering**, v. 53, n. 2, p. 31–38, 2011.
19. NIU, H.; CAO, W. Full-scale testing of high-strength RACFST columns subjected to axial compression. **Magazine of Concrete Research**, v. 67, n. 5, p. 257–270, 2015.
20. OKAMURA, H. **Self-compacting high-performance concrete**. **Concrete International**. Vol. 19, n. 7, 1997. p. 50-54.
21. RAJHANS, P; PANDA, S. K; NAYAK, S. Sustainability on durability of self-compacting concrete from C&D waste by improving porosity and hydrated compounds: A microstructural investigation. **Construction and building materials**, v. 174, p. 559-575, 2018.



22. REIS, N.; Brito, J. Correia, J. R.; Arruda, M. R. T. Punching behavior of concrete slabs incorporating coarse recycled concrete aggregates. **Engineering Structures**, v. 100, p. 238-248, 2015.
23. 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.
24. SINGH, N; SINGH, S. P. Carbonation and electrical resistance of self-compacting concrete made with recycled concrete aggregates and metakaolin. **Construction and building materials**, v. 121, p. 400-409, 2016.
25. SINGH, N; SINGH, S. P. Evaluating the performance of self-compacting concretes made with recycled coarse and fine aggregates using nondestructive testing techniques. **Construction and building materials**, v. 181, p. 73-84, 2018.
26. SOUTSOS, M. N., TANG, K., MILLARD, S.G. Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 25, p-726-735, 2011.
27. T-AM, V. W. Y.; WANG, Z.-B.; TAO, Z. Behaviour of recycled aggregate concrete filled stainless steel stub columns. **Materials and Structures**, v. 47, n. 1-2, p. 293-310, 2014.
28. TANG, Y. C.; LI, L. J.; FENG, W. X.; LIU, F.; LIAO, B. Seismic performance of recycled aggregate concrete-filled steel tube columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 133, p. 112-124, 2017. Elsevier Ltd.
29. WANG, Q.; RANZI, G.; GENG, Y.; WANG, Y. Long-term Experiments of Composite Slabs Using Recycled Coarse Aggregate. , 2011
30. XIAO, J.; HUANG, Y.; YANG, J.; ZHANG, C.. Mechanical properties of confined recycled aggregate concrete under axial compression. **Construction and Building Materials**, v. 26, p. 591-603, 2012.
31. XU, J.; CHEN, Z.; XUE, J.; CHEN, Y.; LIU, Z. A review of experimental results of steel reinforced recycled aggregate concrete members and structures in China (2010-2016). **Procedia Engineering**, v. 210, p. 109-119, 2017.10.
32. YANG, Y. F.; HAN, L. H. Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 62, p.1310-1324, 2006
33. YANG, Y. F.; HAN, L. H.; WU, X. Concrete Shrinkage and Creep in Recycled Aggregate Concrete-Filled Steel Tubes. **Advances in Structural Engineering**, v. 11, n. 4, p. 383-396, 2008.
34. YANG, Y. F.. Behaviour of recycled aggregate concrete-filled steel tubular columns under long-term sustained loads. **Advances in Structural Engineering**, v. 14, n. 2, 189, 2011.
35. YANG, Y. F.. Modelling of recycled aggregate concrete-filled steel tube (RACFST) beam-columns subjected to cyclic loading. **Steel and Composite Structures**, v. 18, n.1, p. 213-233, 2015.
36. ZHENG, Huahai; CHEN, Zongping; XU, Jinjun. Bond behavior of H-shaped steel embedded in recycled aggregate concrete under push-out loads. **International Journal of Steel Structures**, v. 16, n. 2, p. 347-360, 2016.