



Concreto no Brasil: Breve história, desafios atuais e propostas para um futuro sustentável

Vitor Hugo Santana da Silva Quatroque

Discente Mestrando, Unesp, Brasil
vitor.quatroque@unesp.br

Rebeca Delatore Simões

Professora Doutora, Unesp, Brasil
rebeca.simoes@unesp.br

Aldo Eloizo Job

Professor Livre Docente, Unesp, Brasil
aldo.job@unesp.br

RESUMO

O setor de produção de concreto é fundamental na construção civil e em atividades humanas em geral, sendo o produto manufaturado mais abundante do mundo, sua produção gera consequências ambientais e contribui para a aceleração das mudanças climáticas. Este trabalho busca levantar as soluções modernas para produção sustentável de concreto por meio da incorporação de materiais reciclados. Inicialmente, foi realizado um estudo exploratório de caráter documental sobre a história do concreto, a fim de identificar as principais características que levaram à sua adoção em larga escala. Em seguida, foi realizada uma revisão bibliográfica acerca de estudos que buscam superar as problemáticas do concreto, com foco na incorporação de materiais de diversas origens. Por fim, com os dados em mãos, foram compilados os aspectos semelhantes de cada proposta e, a partir disso, foram observados que, apesar dos efeitos negativos nas características originais do produto, verificou-se que os concretos com materiais reciclados ainda possuem características compatíveis que permitem sua adesão em massa. Conclui-se que a incorporação de materiais alternativos no concreto tem um alto potencial de reciclagem de resíduos e pode contribuir para a produção de um concreto mais ecológico, sem comprometer demasiadamente as suas características fundamentais.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto. Resíduo. Materiais reciclados.

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material composto pela mistura de aglomerante, sendo o mais comum o Cimento Portland (CP), água, Agregado Miúdo (AM), geralmente utilizando-se areia, e Agregado Graúdo (AG), comumente brita. Essa mistura, relativamente simples, dá origem a um material versátil capaz de suportar e transmitir cargas de alta intensidade, além de resistir às intempéries climáticas.

Na construção civil, o concreto destaca-se por ser a subárea com maior volume de produção (LASCARRO, 2017), ao ponto de poder ser considerado o produto manufaturado mais abundante na Terra (PEDROSO, 2009). A introdução do concreto no Brasil é um marco para a engenharia e arquitetura nacionais. O produto teve uma rápida assimilação mercadológica e acadêmica. Segundo VASCONCELOS (1992), na década de 1940, o estudo do concreto já era presente nas universidades, possuía normatização oficial pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e era englobado na utilização popular da construção civil.

Ao mesmo tempo que o concreto de CP teve sua escala de utilização acrescida exponencialmente, também houve aumento de atenção acerca de problemáticas quanto à sustentabilidade de sua produção. Sendo as mais comumente levantadas o alto volume de emissões de dióxido de carbono (CO₂) e a geração de resíduos sólido gerados por desperdícios na cadeia de produção e pela demolição de edificações.

Diante desse cenário, surgem propostas de utilização de materiais alternativos na produção de concreto, a fim de mitigar os danos ambientais e ao mesmo tempo manter as características que tornaram o concreto um material hegemônico. Essa medida tem apelo tanto do ponto de vista da redução dos danos causados pela produção de CP, AM e AG, quanto do ponto de vista da destinação de resíduos sólidos que não seriam reaproveitados.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo compreender e avaliar as características que levaram ao amplo uso do concreto no Brasil, assim como levantar os principais desafios atuais relacionados ao material. Por fim serão descritas algumas das soluções propostas para o uso de materiais alternativos no concreto a fim de diminuir os efeitos danosos de sua produção no meio ambiente e que ao mesmo tempo conservam as benesses do produto.

3 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, a metodologia deste estudo consistiu em uma revisão de literatura e pesquisa documental em bases consolidadas de pesquisa científica. Estudou-se a introdução e início da utilização do concreto no Brasil, a fim de identificar as principais características que tornaram o material tão bem-sucedido. Com o intuito de identificar as características que precisam ser investigadas, foram levantados, em fontes diversas e dispersas, os principais desafios e impactos ambientais relacionados ao uso massivo do concreto. Por fim, foram analisadas possíveis soluções e alternativas para o futuro do material, que possam ser aplicadas em larga escala e que mantenham as características que historicamente tornaram o concreto um material amplamente utilizado na indústria da construção civil, reduzindo os impactos ambientais.

4 RESULTADOS

4.1 Revisão da literatura

4.1.1 A história do concreto

Há evidências do uso de concreto desde 2750 a. C. no Egito (HELENE, ANDRADE, 2010), no entanto, o primeiro registro do uso desse material em larga escala data de 300 A.C. no Império Romano, onde se utilizava uma mistura de cinza vulcânica (pozolana) com cal hidratada, que em contato com a água tornava-se dura (PEDROSO, 2009). Uma das obras romanas mais famosas que utilizaram esse material foi o Panteão (Pantheon), finalizado em 125 D.C. O Panteão é notável por possuir, ainda nos dias atuais, a maior cúpula de concreto não reforçado do mundo (WARD-PERKINS, 1992).

Ainda que a utilização de aglomerantes rudimentares seja antiga, segundo FREITAS (2011), o construtor inglês John Smeaton, juntamente com o ceramista e químico William Cookworthy, foram os primeiros a estudar o cimento com uma abordagem científica. Segundo PETERS (1996), a pesquisa resultou na descoberta de que as propriedades hidráulicas do cimento não dependiam da origem ou pureza da pedra calcária, mas sim da adição de silicatos por meio da argila.

Esses resultados tiveram grande influência nas pesquisas posteriores sobre o tema. Com o avanço da pesquisa sobre a produção de concreto, surgiram cada vez mais materiais aglomerantes que receberam o nome de cimento. Em 1796, o inglês James Parker observou que restos de pedras calcárias expostos a determinada temperatura se tornavam duros, nomeando esse produto de "cimento romano" (FREITAS, 2011).

Já o concreto de CP remonta ao ano de 1824 na Inglaterra, quando Joseph Aspdin oficialmente criou a patente do produto (PEDROSO, 2009), o produto apresentado por Aspdin

era resultante da queima de calcário e argila, posteriormente moídos e expostos a altas temperaturas até a retirada do CO₂. Embora a maioria das fontes atribua a Aspdin a invenção do CP, a autora FREITAS (2011) destaca a contribuição de Isaac-Charles Johnson para a criação das bases do processo de fabricação do cimento artificial Portland, que serviu como base para a industrialização e produção consequente do cimento moderno. Por outro lado, KAEFER (1998) complementa que a definição de CP contemporânea não poderia ser aplicada ao produto patenteado por Aspdin, pois é improvável que o inventor tenha conseguido expor sua matéria prima a uma temperatura alta o suficiente para produzir o clínquer.

O processo de industrialização atual da produção de CP passa pelo processo produtivo do clínquer, que é produzido por meio da britagem e moagem de pedra calcária, argila e gesso. Em seguida, o clínquer é submetido a altas temperaturas ($\pm 1500^{\circ}\text{C}$) e rapidamente resfriado

A história do uso do concreto de CP continua em evolução com a proposição da utilização de concreto em conjunto com barras de ferro, KAEFER (1998) devota a primeira publicação sobre “cimento armado”, denominação do concreto armado até a década de 20, a Joseph Louis Lambot, em 1850, cujo material foi patenteado em 1855 e exibido na forma de um protótipo de canoa na Exposição Mundial de Paris. Um dos mais conhecidos marcos históricos acerca da evolução do concreto armado ocorreu quando Joseph Monier executou a primeira ponte de concreto armado do mundo em 1875, na França (MOUSSAR, GARIBALDI, 2017).

4.1.2 O concreto no Brasil: introdução e alcance da hegemonia

O concreto foi introduzido comercialmente em terras brasileiras no início do século XX, trazido por empresas estrangeiras que detinham a patente do produto (VASCONCELOS, 1992), nos anos de 1940 o produto já estava consolidado no meio acadêmico, com normatização pela Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT e já era parte dos cursos de engenharia, bem como englobado no uso popular (SANTOS, 2008). Entretanto, no final do século XIX, já havia sido publicada a obra "Auxiliar do Construtor" pelo engenheiro Cornélio Carneiro de Barros e Azevedo. Essa publicação foi a primeira a utilizar definições de cimento e concreto em um manual técnico para profissionais da construção.

Inicialmente, os primeiros cimentos utilizados no Brasil eram importados, principalmente da Bélgica. No entanto, na década de 1920, já existiam cinco fábricas produtoras de CP no país, cuja a instalação foi fortemente beneficiada por propostas de subsídios públicos. O uso do concreto e, conseqüentemente, da técnica de concreto armado, teve um papel fundamental na construção de obras de saneamento e melhoria da qualidade de vida da população. As primeiras obras que utilizaram essa técnica foram de infraestrutura, construídas na cidade portuária de Santos, a principal porta de entrada de produtos importados, como era o caso do concreto produzido com CP na época (MARCOLIN, 2006). Outro ponto benéfico do material era a facilidade logística, uma vez que o transporte de CP, areia e brita era muito menos oneroso do que o transporte de grandes vigas de aço, especialmente considerando a infraestrutura logística brasileira na época (TELLES, 1994).

Os autores HELENE e ANDRADE (2010) destacam que uma das principais vantagens das obras de concreto é a sua longa vida útil e a necessidade mínima de intervenções de manutenção, o que é benéfico do ponto de vista financeiro. Como exemplo, a estátua do Cristo

Redentor, no Rio de Janeiro, projetada pelo engenheiro Heitor da Silva Costa em colaboração com o projetista francês Albert Caquot e inaugurada em 1931, em toda a sua história precisou de apenas duas intervenções para manutenção.

Do ponto de vista arquitetônico, a popularização do concreto no Brasil foi impulsionada pelo seu uso em obras de arquitetura do Movimento Moderno, especialmente nas décadas de 1940 a 1960 (SANTOS, 2008). Obras icônicas, como o Museu de Arte de São Paulo Assis Chateaubriand (MASP) de 1968, a construção de Brasília em 1960 e o prédio da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAUUSP) de 1948, são exemplos do uso marcante do concreto na arquitetura moderna brasileira.

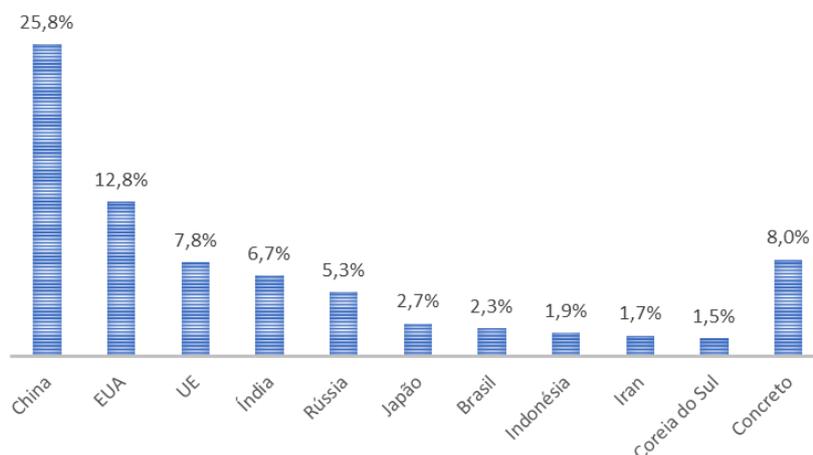
4.1.3 Desafios atuais acerca da utilização do concreto

O concreto armado foi importante na melhoria da infraestrutura e arquitetura moderna no Brasil, mas seu uso em larga escala inibiu a introdução de técnicas construtivas modernas, desqualificando trabalhadores e contribuindo para o aumento da poluição ambiental. Além disso, sob o aspecto arquitetônico, levou à uniformização da paisagem urbana, diminuindo a diversidade e o diálogo entre as edificações e o entorno.

O sistema construtivo é ainda considerado defasado tecnologicamente por ser baseado na manufatura serial. Seu uso enfrenta desafios ambientais relacionados ao seu consumo de recursos naturais e às consequências negativas na extração, locomoção, armazenamento e descarte.

Do ponto de vista ambiental existe especial preocupação quanto a alta proporção de emissão de CO₂ que a sua cadeia produtiva gera. De acordo com os pesquisadores LEHNE e PRESTON (2018), a produção global de concreto é responsável por 8% de todas as emissões de CO₂ produzidas anualmente no mundo. Esse resultado é 14% superior que a média dos 9 países mais emissores de CO₂ do mundo junto com o bloco da União Europeia (UE) (CLIMA WATCH, 2022).

Figura1 – Percentual de emissões do concreto e das 10 regiões mais emissoras de CO₂.



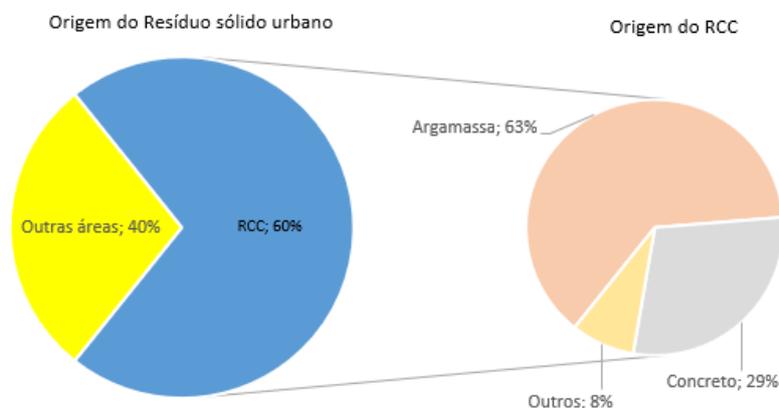
Fonte: Autores (2023)

A maioria das emissões concentra-se na produção CP, sendo que 40% das emissões de CP estão relacionadas à queima de combustíveis fósseis para aquecer os fornos que formam o clínquer (BRITO, KURDA, 2021).

Embora a maior parte das emissões da produção de concreto estejam concentradas na produção CP, os agregados também correspondem a uma parcela significativa das emissões de CO₂ do concreto. De acordo com as estimativas de Flower e Sanjayan (2007), o AG é o segundo material que mais emite na produção de concreto, variando entre 13% e 20% do total de emissões geradas. A produção de AM, considerando que este seja areia natural, emite a quantidade de CO₂, sendo esta emissão concentrada no processo de extração do material. (SIDDIQUE, 2021).

Além das questões relacionadas à cadeia de produção e uso, há uma preocupação atual com a destinação do resíduo gerado pelo concreto. No Brasil, em 2021, cerca de 60% de todo o resíduo urbano foi derivado da construção civil, principalmente pela demolição de imóveis, com uma média de 226,8 kg por habitante por ano (ABRELPE, 2022). Na maioria dos casos, o Resíduo de Construção Civil (RCC) é composto por resíduos de materiais à base de cimento, como argamassas, concretos e blocos (SILVA FILHO, 2005). Ao analisar apenas o RCC proveniente de resíduos de concreto, os pesquisadores Ângulo et al. (2011) estimam que até 50% de todo o RCC produzido provém de restos de concreto, já MONTEIRO et al (2001) estima que especificamente no Brasil os resíduos de concreto correspondam a cerca de 29% do total de RCC. Uma das principais dificuldades relacionadas ao resíduo de concreto é a sua limitada capacidade de reciclagem, que se deve tanto ao grande volume e peso das peças demolidas quanto à falta de destinação adequada do material reciclado. Esse problema representa um grande obstáculo para alcançar a circularidade na construção civil, que consiste em um conceito que busca estratégias para superar a lógica de extração, uso e descarte da economia linear tradicional. O RCC proveniente de materiais à base de cimento é um problema tão relevante que é classificado como resíduo do tipo "A" na Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o que o habilita para uso como agregado reciclado (CONAMA, 2002). Esse enquadramento é importante, pois amplia as possibilidades de utilização do produto, uma vez que demonstra interesse estatal em fomentar seu reaproveitamento.

Figura2 - Geradores de resíduo sólido no Brasil



Fonte: Autores (2023)

Diante dos desafios atuais relacionados ao concreto e em conformidade com as regulamentações legais diversas propostas de opções sustentáveis que visam tornar o concreto do futuro um material mais circular em termos de uso de recursos naturais veem ganhando destaque na comunidade científica.

4.2 Propostas de inovação sustentável para o concreto

4.2.1 Utilização de cinzas de resíduos agroindustriais como substituto ao aglomerante

Entre os vários tipos de resíduos agrícolas que podem ser utilizados, as cinzas da casca de arroz (CCA) chamam a atenção. Segundo PANDEY e KUMAR (2019), esse material tem baixo valor econômico e aumenta a resistência à compressão mecânica do concreto final quando usado como aglomerante em conjunto com microsílica (MS). Os estudos mostraram que a quantidade de sílica presente na CCA é cerca de quatro vezes maior em comparação com o CP. Além disso, o seu reaproveitamento é apelativo, uma vez que é um subproduto do arroz gerado em grandes quantidades por países produtores, a maioria dos quais está localizada no continente asiático.

De maneira semelhante à CCA, as cinzas de outras origens também possuem uma presença elevada de sílica. Entretanto, cinzas de tabaco e cascas de amendoim apresentam valores abaixo da média da maioria dos materiais testados e revisados por Charita et al. (2021). Os mesmos autores identificam que a adição de cinzas de agro resíduo de qualquer origem prejudica a trabalhabilidade do concreto, devido ao aumento do número de poros e, por consequência, aumenta-se a absorção de água pela pasta fresca de concreto. No mesmo artigo, ainda se conclui que ao considerar o ponto ótimo de substituição de CP por cinzas a resistência à compressão e aos ataques químicos tendem a ser aumentadas.

4.2.2 Utilização de resíduos de borracha de pneu como agregado miúdo

Embora tenha alta demanda em volume, menos de 0,20% da massa de borracha para pneus produzida no Brasil é reciclada (FAZZAN, PEREIRA E AKASAKI, 2016). Esse alto volume de material não reciclado torna a borracha de pneu um produto que pode suprir altas quantidades de utilização como AM. A utilização da borracha como agregado, ainda é impulsionada pelo fato de que o AM, diferentemente do CP, não participa do processo de hidratação, o que diminui consideravelmente a complexidade necessária para adequação do material para uso (SHI, ZHENG, 2007). Um dos aspectos mais importantes para que um material possa ser enquadrado como AM é a sua granulometria, isto é a determinação da distribuição dos tamanhos das partículas que compõem o material. No estudo realizado por FAZZAN, PEREIRA e AKASAKI (2016), uma preparação de amostras de borracha de pneus foi dividida em borracha grossa, média e fina, para ser utilizada como AM do concreto., sendo que o material se aproximou de ser totalmente enquadrado na zona granulométrica utilizável, ficando fora desta em apenas três dos oito pontos analisados.

Para um espécime com substituição de 10% do volume de AM por borracha de pneus, os pesquisadores encontraram resultados que indicam que a adição da borracha provocou uma

redução nos valores de absorção de água. Além disso, a baixa densidade da borracha resulta em uma diminuição da massa específica do produto final, o que indica que estruturas que utilizem esse material teriam menor peso próprio e poderiam ser mais esbeltas. Em relação à resistência à compressão, o produto apresentou uma melhora de 10% em relação ao controle, além de ter um módulo de elasticidade ligeiramente acima do módulo do produto sem adição de resíduos (FAZZAN, PEREIRA e AKASAKI, 2016).

4.2.3 Proposta de produção de concreto estrutural leve com adição de EPS

A função estrutural do concreto é uma das suas características mais conhecidas e utilizadas. A versatilidade do material a ser usado em pilares, vigas e lajes é uma propriedade muito explorada na arquitetura e engenharia. Entretanto, estruturas de concreto além de resistir à esforços dos carregamentos de utilização devem sustentar o próprio peso. Isso é um fator que acaba por gerar mais gasto de material e econômico. Uma das alternativas para isso é a utilização de concretos leves estruturais, ou seja, materiais que mantem as mesmas, ou semelhantes, características de resistência do material, entretanto possuem massa específica diminuta (CATOIA, 2012).

Exemplo deste tipo de pesquisa é o trabalho executado por XAVIER, BASSANI e MENDES (2016) que investigou a possibilidade da adição de EPS reciclado para a produção de um concreto leve que possa ser enquadrado como estrutural e que tenha menor massa específica. No trabalho dos autores foram utilizados rejeitos de EPS de uma obra localizada na cidade de Palmas-TO. O traço de referência foi uma massa de concreto que é enquadrado como de alto desempenho e que possui em sua composição sílica e aditivo superplastificante. A adição do EPS foi realizada em porção de 0,0091 m³ (T1), 0,02m³ (T2) e 0,04 m³ de EPS (T3). A caracterização do material reciclado demonstrou que o EPS possui em sua maioria partículas esféricas de 5 mm e massa específica de 11 kg/m³ (XAVIER, BASSANI, MENDES, 2016).

Os resultados indicam que houve uma redução significativa na massa específica do concreto produzido com a adição de EPS reciclado nos traços T1, T2 e T3. O concreto produzido com o traço T3 obteve uma redução de 0,58 kg/dm³ na sua massa específica, possibilitando seu enquadramento como concreto leve de acordo com as referências da ACI 213R-87 e NS 3473 E. Já o traço T2 pode ser considerado leve de acordo com a NS 3473 E, com uma redução de 0,37 kg/dm³ em relação ao controle. Também foi observada uma redução nos valores apresentados pelo ensaio de abatimento de tronco de cone, indicando uma diminuição da trabalhabilidade da massa com a adição de EPS. Enquanto o traço controle apresentou slump de 70 mm, os traços com EPS resultaram em 60 mm (T1 e T2) e 40 mm (T3).

Além disso, quanto à resistência à compressão aos 28 dias, houve redução nos valores em todos os traços. Enquanto o controle atingiu uma resistência média de 61,40 MPa, os traços com EPS obtiveram valores de 46,20 (T1), 21,0 (T2) e 12,30 MPa (T3). Isso está de acordo com as expectativas dos autores, uma vez que quanto maior a adição de EPS, maior é o efeito negativo sobre a resistência do concreto. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que o traço T2 foi o único traço com massa específica enquadrada como concreto leve e que alcançou resistência superior a 20 MPa e, portanto, pode ser classificado também como

concreto estrutural. Além disso, de acordo com os pesquisadores, houve aumento da absorção de água em virtude do aumento de vazios em torno das partículas de EPS.

4.2.4 Substituições simultâneas no aglomerante e agregado: fibras de vidro e casca de coco

Diferentemente das propostas anteriores que focam na substituição de aglomerante ou agregados, alguns esforços visam produzir concretos com materiais reciclados combinados. Essa abordagem tem a vantagem de reduzir a necessidade de matéria-prima e aumentar a utilização de materiais derivados de descarte. Um dos trabalhos recentes mais notáveis nesse cenário é o apresentado pelos pesquisadores ZAID et al. (2021), que buscam a utilização de fibras de vidro (FV) na produção de concreto com sílica ativa (SA) e casca de coco (CC) como substituto para o aglomerante.

Utilizando as proporções citadas na tabela 1, os pesquisadores formularam quatro traços, cada um incorporando as respectivas adições de resíduos em substituição ao que seria consumido na produção do traço controle (ZAID et al., 2021). Os resultados mostraram que quanto maior as taxas de substituições dos materiais convencionais por materiais reciclados, maior o impacto negativo na trabalhabilidade do concreto. Todas as proporções estudadas apresentaram um valor menor de abatimento de tronco de cone quando comparado ao piloto. O maior decréscimo, de -20 mm, foi observado no traço 4, que uniu as maiores porcentagens de utilização de materiais reciclados. Por outro lado, com exceção do traço 4, os testes de resistência à compressão dos outros três traços foram superiores aos obtidos no ensaio do traço controle. Ainda, observou-se que somente o traço 4 apresentou densidade 22% menor que a do controle, enquanto que as demais proporções apresentaram aumento na densidade do produto final. O maior aumento observado foi do traço 3 com resultado 6% superior em relação ao controle.

Os pesquisadores destacam, que a adição de FV ao concreto melhora a sua durabilidade, isso se deve ao fato de que o vidro reduz a porosidade do material, o que diminui a penetração de ácidos, o que é uma vantagem importante em aplicações específicas que demandem maior resistência à ataques químicos. Além disso, por meio de análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), os autores concluíram que FV têm efeitos de diminuição da propagação de fissuras no concreto, o que, por sua vez, reflete em benefícios para as propriedades mecânicas de resistência do material (ZAID et al., 2021), também apontam na mesma direção as indicações de que a utilização de pó fino de vidro possui propriedades pozolânicas consideradas suficientes para a utilização em concreto e não indicaram presença de fissuras decorrentes de reação álcali-agregado (BRITO, KURDA, 2020).

Este estudo destaca como o concreto do futuro pode ser produzido com a adição de diferentes materiais com objetivos específicos. Os pesquisadores constataram que o uso exclusivo de cascas de coco como AG resulta em um produto com resistência e propriedades gerais medianas. No entanto, quando combinado com sílica e FV, que são subprodutos industriais, todas as características do concreto tendem a ser aprimoradas, podendo até mesmo superar as do produto convencional (ZAID et al., 2021). A combinação de diferentes materiais de descarte para melhoria das características do concreto também é relatada por ALI et al (2020), que utilizou FV e cinzas de volantes industrializadas para suprir os efeitos negativos da

introdução de RCC como AG Além disso, a combinação de mais de um resíduo na produção de concreto contribui para a conservação ambiental e redução de custos de produção.

4.2.5 Utilização de agregado reciclado: regularização brasileira e utilização em Hong Kong

A resolução brasileira (CONAMA) demonstra o interesse do Estado em aumentar a reciclagem de RCC, de semelhante modo em Hong Kong no ano de 2002 o governo local instalou uma estação de reciclagem de RCC com o objetivo de incentivar a utilização desse material em diferentes granulometrias (POON, CHAN, 2007).

A reciclagem de RCC é uma preocupação mundial, e tanto Hong Kong quanto o Brasil têm políticas públicas para incentivar o uso de RCC como agregado no concreto que possuem pontos convergentes. Ambos os países classificam os resíduos de demolição de concreto como aptos para uso como agregado. No entanto, há diferenças nas resoluções, pois a brasileira é mais abrangente e permite a utilização de diversos tipos de RCC como agregado, enquanto em Hong Kong somente o RCC proveniente de concreto é utilizado. Outra diferença significativa é a peculiaridade da geração de RCC em Hong Kong, onde a grande concentração de pessoas em uma pequena área montanhosa resulta na demolição em grande escala de obras antigas para dar lugar a edifícios verticais. Isso resulta na produção de uma enorme quantidade de resíduos de construção, estimada em 20 milhões de toneladas. (POON, CHAN, 2007).

Os pesquisadores POON e CHAN (2007) analisaram um estudo de caso da construção do Hong Kong Wetland Park, que consistiu em duas etapas, concluídas em 2000 e 2005, respectivamente. Na segunda fase, com área de 10 mil m², foram utilizados 13 mil m³ de concreto produzido com RCC como agregado. Os pesquisadores observaram que a porcentagem de substituição dos agregados por RCC variava conforme a utilização do concreto. Devido à falta de experiência na utilização de RCC no concreto, os valores da utilização de cimento precisaram ser aumentados para compensar a maior demanda de água que o agregado reciclado requer.

Após análises experimentais, os autores verificaram que utilizar RCC como AG e AM simultaneamente, afeta a resistência e durabilidade do concreto. No entanto, utilizar RCC separadamente como AG ou AM é viável do ponto de vista experimental e prático.

Conforme mencionado anteriormente, a legislação em Hong Kong é menos abrangente do que a do Brasil em relação ao uso de RCC como agregado no concreto. Os autores deste estudo propuseram a experimentação de traços com RCC provenientes de tijolos e telhas, utilizando dois métodos de mistura: convencional e dupla. O método convencional envolve a mistura dos materiais por dois minutos antes da inserção de água, enquanto o método duplo consiste na adição da metade do volume total de água, seguida pelo aglomerante após um minuto, e o restante da água adicionado e misturado por mais 90 segundos. Ambos os métodos foram analisados, pois os agregados testados possuem grande absorção de água, o que poderia influenciar nos resultados futuros.

Os testes de slump (abatimento de tronco de cone) demonstraram que os traços de concreto reciclado que utilizaram o método de mistura dupla tiveram em média 33% de abatimento no ensaio. Por outro lado, a densidade praticamente não foi afetada e a resistência à compressão aos 28 dias foi consideravelmente beneficiada pelo método de mistura dupla. Com isso, os autores indicam que é viável expandir a gama de utilização de RCC proveniente de

outras fontes para uso como agregado. No entanto, os autores fazem ressalvas quanto às substituições maiores que 20% da massa de AM (POON, CHAN, 2007).

4.3 Discussões dos dados

Os autores dos trabalhos descritos apresentaram diversos cenários de substituição de agregados convencionais por materiais reciclados, e todos chegaram a resultados de proporções para a produção de concreto. A Tabela 1 apresenta as proporções de cada material em quantidade, em massa, para a produção de um metro cúbico de concreto (kg/m^3) utilizadas nos estudos dos 5 trabalhos analisados, além das indicações percentuais de substituições aplicadas em cada caso.

Tabela1: Valores dos traços para produção de 1m^3 de concreto

PANDEY, KUMAR (2019)								
CP	AM	AG	Água	MS	Aditivos	CCA	Observações	
406	663,87	1248,97	158	-	1,62	-	Controle	
405,1	663,87	1248,97	158	-	6,69	40,6	10% CCA	
395,85	663,87	1248,97	158	10,15	3,65	-	2,5% MS	
385,7	663,87	1248,97	158	20,3	4,26	-	5% MS	
375,55	663,87	1248,97	158	30,38	4,86	-	7,5% MS	
365,4	663,87	1248,97	158	40,6	5,28	-	10% MS	
364,59	663,87	1248,97	158	20,3	6,90	20,3	5% MS 5% CCA	
355,25	663,87	1248,97	158	10,15	8,12	30,45	5% MS 7,5% CCA	
345,1	663,87	1248,97	158	40,6	9,74	20,3	10% MS 5% CCA	
334,95	663,87	1248,97	158	40,6	10,15	30,45	10% MS 7,5% CCA	
FRAZZAN, PERREIRA, AKASAKI (2016)								
CP	AM	AG	Água	Borracha		Observações		
342	884	1003	192	-		Controle		
360	772,6	1197,1	140	36		10% Borracha		
XAVIER, BASSANI, MENDES (2016)								
CP	AM	AG	Água	Sílica	Aditivos	EPS	Observações	
416	737	1030	153	34	3	-	Controle	
416	737	1030	153	34	3	4,5	+ 100 g de EPS	
416	737	1030	153	34	3	9	+ 200 g de EPS	
416	737	1030	153	34	3	18	+ 400 g de EPS	
ZAID, et al. (2021)								
CP	AM	AG	Água	SA	Aditivos	CC	FV	Observações
320	460	895	175	-	2,4	-	-	Controle
304	460	760,75	175	16	2,4	134,25	15,22	15% CC 0,5% FV 5% SA
288	460	625,5	175	32	2,4	268,5	28	30% CC 1% FV 10% SA
272	460	492,25	175	48	2,4	402,75	40,8	45% CC 1,5% FV 15% SA
256	460	358	175	64	2,4	537	51,2	60% CC 2% FV 20% SA
POON, CHAN (2007)								

CP	AM	AG	Água	RCC (tijolo)	RCC (telha)	Observações
410	642	1043	225	-	-	Controle
410	514	1043	225	128	-	20% RCC (tijolo)
410	514	1043	225	-	128	20% RCC (telha)

Fonte: Autores, 2023.

Em relação aos experimentos, os artigos analisados testaram várias propriedades do concreto com material reciclado, mas a trabalhabilidade da massa fresca e a resistência à compressão após 7 e 28 dias foram os testes comuns à todos os artigos. Essas propriedades são críticas para determinação da possibilidade do uso do concreto reciclado em aplicações estruturais, conforme o estabelecido pela norma NBR 8.953/2015. Para ser considerado estrutural, o concreto deve ter um Slump entre 100 e 160 mm para ser lançado por métodos convencionais e uma resistência à compressão mínima de 20 MPa aos 28 dias de idade (NBR 8.953, 2015). A Tabela 2 resume os valores obtidos de trabalhabilidade e resistência à compressão nos cinco artigos analisados

Tabela2: Valores de Slump Test e resistência à compressão mecânica aos 7 e 28 dias de idade

PANDEY, KUMAR (2019)			
Mistura	Slump (mm)	7Dias (Mpa)	28Dias (Mpa)
Controle	50	37,00	48,77
10% CCA	50	38,00	53,02
2,5% MS	50	38,80	54,08
5% MS	50	39,20	55,01
7,5% MS	50	32,80	51,07
10% MS	50	37,80	50,96
5% microsíllica 5% CCA	50	38,70	53,61
5% microsíllica 7,5% CCA	50	37,70	48,99
10% microsíllica 5% CCA	50	37,74	49,22
10% microsíllica 7,5% CCA	50	37,20	48,88
FRAZZAN, PERREIRA, AKASAKI (2016)			
Mistura	Slump (mm)	7Dias (Mpa)	28Dias (Mpa)
Controle	80	20,04	27,00
10% Resíduo de Borracha	110	20,94	28,37
XAVIER, BASSANI, MENDES (2016)			
Mistura	Slump (mm)	7Dias (Mpa)	28Dias (Mpa)
Controle	70	47,75	61,40
+100 g de EPS	60	36,80	46,20
+ 200 g de EPS	60	16,35	21,00
+ 400 g de EPS	40	12,20	12,30
ZAID, et al. (2021)			
Mistura	Slump (mm)	7Dias (Mpa)	28Dias (Mpa)
Controle	55	10,00	21,00
15% Casca de coco 0,5% fibra de vidro 5% Microsíllica	45	11,00	23,00
30% Casca de coco 1% fibra de vidro 10% Microsíllica	40	15,00	24,00
45% Casca de coco 1,5% fibra de vidro 15% Microsíllica	37	16,00	25,00

60% Casca de coco | 2% fibra de vidro | 20%
Microsílica

35

9,00

19,00

Mistura	POON, CHAN (2007)		
	Slump (mm)	7Dias (Mpa)	28Dias (Mpa)
Controle (mistura convencional)	160	39,90	45,60
Controle (mistura dupla)	95	53,80	61,40
20% RCC (tijolo mistura convencional)	175	33,60	35,70
20% RCC (tijolo mistura dupla)	110	47,20	50,40
20% RCC (telha mistura convencional)	150	30,50	43,20
20% RCC (telha mistura dupla)	120	45,50	55,30

Fonte: Autores, 2023

5 CONCLUSÃO

Com base nas informações coletadas, observou-se que o concreto é amplamente utilizado devido, entre outras coisas, à sua resistência, durabilidade, facilidade de produção, disponibilidade de matéria-prima, versatilidade arquitetônica e não exigência de mão de obra qualificada. No entanto, sua produção em grande escala gera resíduos não reaproveitados, consome recursos naturais finitos e contribui para as mudanças climáticas. A utilização de RCC como agregado é uma das mais viáveis, já sendo incentivada por leis estatais e empregada em grandes empreendimentos. Substituir CP por materiais reciclados torna o concreto menos oneroso do ponto de vista monetário e também quanto as emissões de CO₂. Já substituições em AG e AM tendem a ser apelativas para reciclar materiais originalmente despejados incorretamente, já que estes são a maior parte do volume do material. Em suma, o uso de concreto reciclado para aplicações estruturais é uma alternativa promissora e sustentável e vem a contribuir com futuro mais ecologicamente correto.

REFERÊNCIAS

ALI, B. A step towards durable, ductile and sustainable concrete: Simultaneous incorporation of recycled aggregates, glass fiber and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 251, ago./2020.

ANGULO, S.C. et al. Resíduos de construção e demolição: avaliação de métodos de quantificação. **Eng Sanit Ambient**. São Paulo, p. 299-306. jul. 2011

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. Brasil, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8.953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA Nº 307, de 5 de julho de 2002.

BRITO, J. KURDA, R. The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 281, jan./2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620336039>. Acesso em: 08/01/2023.

- CATOIA, T. **Concreto Ultraleve estrutural com pérolas de EPS: Caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes**. Tese de doutorado em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2012.
- CHARITHA, V. *et al.* Use of different agro-waste ashes in concrete for effective upcycling of locally available resources. **Construction and Building Materials**, v. 285, Mar./2021.
- CLIMA WATCH. Global greenhouse gas emissions excluding land-use change and forestry (LUCF). Washington, D.C, 2022.
- FAZZAN, J. V., PEREIRA, A. M., AKASAKI, J. L. Estudo da viabilidade de utilização do resíduo de borracha de pneu em concretos estruturais. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 12, n. 06, 2016.
- FLOWER, D. J. M. SANJAYAN, J. G. Green house gas emissions due to concrete manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. v. 12, n. 282, mar./2007.
- FREITAS, M. L. **Modernidade concreta: As grandes construtoras e o concreto armado no Brasil, 1920 a 1940**. 2011. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo de São Paulo, São Paulo, 2011.
- HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010.
- KAEFER, L. F. A evolução do concreto armado. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, São Paulo, 1998. Disponível em: <https://www.feb.unesp.br/lutt/Concreto%20Protendido/HistoriadoConcreto.pdf>. Acesso em: 03/03/2023.
- LASCARRO, M. A Federação Ibero-americana do Concreto Pré-misturado (FIHP) analisa os principais números da indústria. *Construção Latino Americana (CLA)*. 2017.
- LEHNE, J. PRESTON, F., Making concrete change: innovation in low-carbon cement and concrete. **Chatham House Report**. Jun./2018. Disponível em: <https://www.chathamhouse.org/2018/06/making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and-concrete>. Acesso e: 06/01/2023.
- MARCOLIN, N. Criação no concreto. *Revista Pesquisa Fapesp*. Edição 127. Set./2006. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/criacao-no-concreto/>. Acesso em: 07/03/2023.
- MONTEIRO, J. H. P. et al. *Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM), 2001.g
- MOUSSAR, M., GARIBALDI, P., The Invention of Reinforced Concrete (1848 – 1906). In: HORDIJK, D., LUKOVIĆ, M. (eds) **High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet**. Springer, Holanda, 2017
- PANDEY, A.; KUMAR, B. Effects of rice straw ash and micro silica on mechanical properties of pavement quality concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 26, 2019.
- PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto & Construções**. v. 37, n. 53, p. 14-19. Jan.-fev./2009.
- PETERS, Tom F. **Building the nineteenth century**. Cambridge, Mass; Londres: The MIT Press, 1996.
- POON, C., CHAN, D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, p. 293-305. Mai./2007.
- SANTOS, R. E. **A armação do concreto no brasil: História da difusão da tecnologia do concreto armado e da construção de sua hegemonia**. 2008. Tese (Doutorado) - Faculdade de Educação da UFMG, Belo Horizonte, 2008.
- SHI, C. ZHENG, K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. **Resources Conservation & Recycling**. v. 52. P. 234-247. 2007.



SIDDIQUE, R. BELARBI, R. Sustainable Concrete Made with Ashes and Dust from Different Sources. Woodhead Publishing. 1ª edição. Woodhead Publishing. 2021.

SILVA FILHO, A. F. **Gestão dos resíduos sólidos das construções prediais na cidade de Natal- RN**. Dissertação (Mestrado Engenharia de Produção). Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Natal, 2005.

TELLES, P. C. S. **História da Engenharia no Brasil. Século XX**. Rio de Janeiro, CLAVERO, 1994.

VASCONCELOS, C. A. **Concreto no Brasil: Recordes, Realizações, Histórias**. Editora Pini, São Paulo, 1992

WARD-PERKINS, J. B. **Roman Imperial Architecture**. Yale; The Yale University Press Pelican History of Art, p. 532; 1992.

XAVIER, B. C., BASSANI, F., MENDES, A. S. Avaliação do Concreto Leve Estrutural com EPS Reciclado. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 12, n. 03, 2016.

Z Aid, O. et al. A step towards sustainable glass fiber reinforced concrete utilizing silica fume and waste coconut shell aggregate. **Nature**, v. 11, n. 1, p. 12822, 2021.