

Utilização de material cerâmico proveniente do RCD para aplicação em concreto: uma revisão

Danillo Almeida e Silva,
Carlos Eduardo Luna de Melo*

Resumo Os resíduos sólidos, produzidos a partir das atividades de construção e demolição, chegam a vários milhões de toneladas diariamente. Dentre estes resíduos, o material cerâmico “tijolos, telhas e revestimentos cerâmicos” está entre os mais abundantes. Nos últimos anos, inúmeras pesquisas foram realizadas para a produção de concretos mais ecológicos. O uso de resíduo cerâmico como agregado graúdo e miúdo para produção de concretos é uma das abordagens comumente pesquisadas, porém pesquisas recentes estão estudando a viabilidade da utilização de pó cerâmico como substituição de cimentos para produção de concretos. Os resultados apontam que a substituição de cimento por pó de cerâmica vermelha pode melhorar algumas propriedades do concreto, devido ao potencial de reatividade pozolânica das partículas de pó cerâmico.

Palavras-chave: cerâmica, RCD, concreto.

Uso del material cerámico RCD para la aplicación de concreto: una revisión

Resumen Los residuos sólidos, producidos por las actividades de construcción y demolición, alcanzan varios millones de toneladas diarias. Entre estos residuos, el material cerámico “ladrillos, tejas y baldosas cerámicas” se encuentra entre los más abundantes. En los últimos años se han llevado a cabo numerosas investigaciones para producir un hormigón más respetuoso con el medio ambiente. El uso de residuos cerámicos como agregado grueso y fino para la producción de hormigones es uno de los enfoques comúnmente investigados, investigaciones recientes están estudiando la factibilidad de utilizar polvo cerámico como sustituto de cementos para la producción de hormigones. Los resultados indican que la sustitución del cemento por polvo cerámico rojo puede mejorar algunas propiedades del hormigón, debido al potencial de reactividad.

Palabras clave: cerámica, RCD, hormigón.

Use of ceramic material from BDW for concrete application: a review

Abstract Solid waste, produced from construction and demolition activities, reaches several million tons daily. Among these residues, the ceramic material “bricks, tiles and ceramic tiles” is among the most abundant. In recent years, numerous researches have been carried out to produce more environmentally friendly concrete. The use of ceramic waste as coarse and fine aggregate for the production of concretes is one of the commonly researched approaches, however recent research is studying the feasibility of using ceramic powder as a substitute for cements for the production of concretes. The results indicate that the substitution of cement by red ceramic powder can improve some properties of concrete, due to the potential of pozzolanic reactivity of ceramic powder particles.

Keywords: ceramics, RDW, concrete.

A necessidade de desenvolver concretos com agregados não convencionais é urgente por razões ambientais e econômicas. Uma revisão de pesquisas anteriores nos mostra que os resíduos industriais e outros subprodutos foram adicionados na fabricação de cimentos “aglomerantes hidráulicos” utilizados para fabricação de concretos com o objetivo de melhorar as propriedades do concreto e reduzir seu custo. Hoje, o objetivo de incorporar o RCD-R como agregado no concreto estrutural e não estrutural, não é uma alternativa e sim um objetivo para a sustentabilidade da construção civil.

O Brasil é o segundo maior consumidor de material cerâmico do mundo, chegando a um número próximo de 70 bilhões de peças produzidas por ano, composto por 25% de telha, 75% de lajotas, pisos e blocos. A área da construção civil é responsável por gerar em torno de 40% da totalidade de resíduos, que se acumulam em aterros, gerando vários problemas ambientais (Stroher et al., 2017).

A cerâmica vermelha é um material de grande importância para a construção civil, considerada um dos recursos mais utilizados nas construções do Brasil, sendo encontrada na maioria das vedações e coberturas, resultando em uma produtividade anual que utiliza grande quantidade de recursos naturais não renováveis (Stroher et al., 2017).

O uso de tijolo britado ou alvenaria de tijolo britado como agregado no concreto está longe de ser um conceito novo. Após a Segunda Guerra Mundial, na Inglaterra e na Alemanha, escombros de prédios de tijolos danificados ou destruídos por bombas foram triturados em usinas de reciclagem de entulho, produzindo agregado de alvenaria de tijolo triturado que foi usado na construção de novos concretos (Hansen, 1986).

O reaproveitamento de resíduos de construção como agregados está se tornando cada vez mais abrangente devido ao impacto ambiental e os altos custos relacionados a extração, transporte e destinação dos resíduos em aterros. Incentivos para práticas de construção sustentável deve se tornar uma prática diária na Indústria da Construção Civil.

A relativa abundância de recursos naturais já pode ser questionada. Segundo (Silva, 2012), a disponibilidade de matérias-primas dentro ou em torno dos grandes aglomerados urbanos do país vem diminuindo, em virtude de planejamento inadequado, problemas ambientais, zoneamento restritivo e usos competitivos do solo. A possibilidade de exploração desses recursos está tornando-se relativamente limitada, tornando-se incertas as perspectivas de suprimento futuro. Até o presente momento, o preço relativamente baixo destes insumos deveu-se ao fácil acesso às reservas e às pequenas distâncias de transporte.

Muita pesquisa está sendo realizada sobre o uso de agregados de concreto reciclados (Amorim; Brito, 2012; Evangelista; Bito, 2010; Tam; Gao; Tam, 2005), materiais cerâmicos britados (Aliabdo; Abd-Elmoaty; Hassn, 2014), “entulho misto” concreto, blocos de concreto, tijolo e outros materiais em concreto (Gomes; Brito, 2007).

* Danillo Almeida e Silva é Arquiteto e Urbanista, Doutorando em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, ORCID <<http://orcid.org/0000-0001-6402-8086>>. Carlos Eduardo Luna de Melo é Engenheiro Civil, Professor da Universidade de Brasília, ORCID <<http://orcid.org/0000-0003-2160-6776>>.

No Brasil, várias pesquisas têm sido publicadas sobre o uso de alvenaria de tijolo ou material cerâmico reciclado como agregados em concreto.

Uma grande quantidade de entulho de construção RCD são produzidos no Brasil a cada ano, e podem ser uma fonte de novos recursos. Este material pode fornecer uma fonte significativa de agregados que podem ser usados para produzir concreto mais sustentável e materiais adequados para determinada finalidade. Além de reduzir a quantidade de resíduos que são descartados em aterros, outros benefícios ambientais podem ser alcançados, como a almejada sustentabilidade da indústria da construção civil.

Agregados de tijolos cerâmicos têm características, tais como alta absorção de água e formas de partículas angulares, que são frequentemente vistas como indesejáveis (Silva; Geyer, 2018). A inclusão da fração de matéria prima secundária “cerâmica de tijolo e argamassa” reciclada traz preocupações com a absorção e inclusão de impurezas (Leite, 2001), bem como resistência à abrasão e zonas fracas, devido à argamassa e aderência ao agregado reciclado “argamassa velha” (Gomes; Brito, 2007). Essas características devem ser consideradas no desenvolvimento de projetos de dosagem em concreto estruturais e não estruturais.

O setor de construção pode transformar e absorver os resíduos gerados em seu próprio ciclo de atividade usando parte de agregado reciclado em vez de agregado natural para fazer concreto, o que gera uma quantidade substancial de resíduos, reduzindo assim, a necessidade de utilizar recursos naturais (García-González et al., 2015).

Em virtude da grande relevância das questões ligadas à preservação do meio ambiente e da qualidade de vida, surge a necessidade de buscar novos conceitos e soluções dentro de uma visão de sustentabilidade e comprometimento com a questão ambiental. De tal modo, a reciclagem e o aproveitamento dos resíduos constituem-se como preocupação nacional, e até mesmo mundial. Um exemplo disso é que um dos maiores problemas da sociedade moderna é a destinação final dos resíduos sólidos urbanos (Landolfo; Oliveira; Nogueira, 2014).

Resíduos de construção e demolição

O agregado de concreto reciclado foi objeto de vários estudos (Angulo; John, 2002; Gomes; Brito, 2007; Hansen, 1981; Nagataki et al., 2004; Poon; Shui; Lam, 2004; Tam; Gao; Tam, 2005) com o objetivo de produzir novos concretos com resistências compatíveis e aceitáveis para o mercado da construção civil. No entanto, o uso de agregados de tijolo cerâmico reciclado tem sido limitado, principalmente a usos menos nobres na construção, tais como preenchimento de canteiros ou aterros. Isto é ocasionado devido as impurezas no material, falta de conhecimento do desempenho de seu uso em concreto, falta de padrões disponíveis sobre o uso de agregados reciclados em concreto e a alta absorção de água dos agregados cerâmicos reciclados (Khalaf, 2006).

Produtos cerâmicos são substâncias inorgânicas provenientes de diversas matérias-primas, principalmente argilas, que são atomizadas em temperaturas variando entre 700 ° C e 1800 ° C, dependendo do produto final desejado, adquirindo consistência *rochosa* no processo. A composição química dos materiais cerâmicos pode variar consideravelmente e, portanto, apresentam diferentes propriedades; no entanto,

em geral, são duros, porém frágeis, com bom comportamento de isolamento em relação à temperatura e à eletricidade. Eles também têm um alto ponto de fusão, são assépticos, não transmitem odores ou bactérias e requerem pouca manutenção (García-González et al., 2015).

Vários estudos examinaram o uso de resíduos cerâmicos de várias fontes como agregados graúdos no concreto (Cabral; Schalch; Molin, 2009; Cavalline; Weggel, 2013; Hansen, 1981; Khalaf, 2006; Senthamarai; Devadas, 2005). Enquanto em outros, o resíduo de cerâmica foi usado para substituir agregados miúdos e graúdos no concreto (Aliabdo; Abd-Elmoaty; Hassan, 2014).

No contexto de buscar novas alternativas para os resíduos cerâmicos, várias pesquisas estão sendo desenvolvidas no Brasil (Brasileiro; Matos, 2015; Cabral; Schalch; Molin, 2009; Landolfo; Oliveira; Nogueira, 2014) e em outros Países (Aliabdo; Abd-Elmoaty; Hassan, 2014; Senthamari; Devadas, 2005), com o objetivo de inserir resíduos da construção e demolição em concretos como alternativa de preservação ambiental e economia, possibilitando um destino mais sustentável aos resíduos cerâmicos, evitando que os mesmos sejam depositados em aterros (Landolfo; Oliveira; Nogueira, 2014).

Conforme (Akhtaryzzaman; Hasnat, 1983), em seus estudos, utilizou tijolos de clínquer triturados como agregado graúdo no concreto. Ele relatou apenas uma perda de 7% na resistência à compressão do concreto em comparação com o concreto de referência “produzido com agregados naturais”. Em contraste com esta diminuição da resistência, há uma diminuição no peso unitário do concreto reciclado de 9,5%.

A dependência contínua desses recursos naturais para produzir concreto só causará mais danos ao meio ambiente. Assim, o potencial de reciclagem e reutilização de resíduos de tijolos na produção de concreto é considerado uma alternativa ecologicamente correta, que não só reduz seu problema de descarte, mas também ajuda a diminuir a dependência de matérias-primas naturais não renováveis (Wong et al., 2018).

Resíduos cerâmicos em outros países

Os resíduos cerâmicos constituem assim, um dos mais importantes resíduos de construção e demolição em todo o mundo. No entanto, a reutilização e reciclagem destes materiais fora do rigoroso ciclo de produção fabril ainda não é uma prática comum, especialmente em Portugal, onde mais de 95% do volume total de RCD produzido é depositado em aterros (Brito; Pereira; Correia, 2005).

Na Europa, a quantidade de resíduos nas diferentes fases de produção da indústria cerâmica atinge cerca de 3% a 7% da sua produção global, o que significa milhões de toneladas de argilas calcinadas por ano. Com o aumento das restrições aos aterros sanitários na área da União Europeia, os custos da disposição de seus resíduos aumentaram e as indústrias terão de encontrar maneiras de reutilizar seus resíduos. Embora a reutilização de resíduos cerâmicos tenha sido praticada, a quantidade de resíduos reutilizados dessa forma ainda é insignificante. Portanto, a necessidade de sua aplicação em outras indústrias está se tornando absolutamente vital (Pacheco-Torgal; Jalali, 2010).

Durante as últimas duas décadas, muitas estruturas no Egito atingiram seus tempos de vida de projeto ou foram desocupadas devido a vida útil ter sido atingida ou má execução das construções. De fato, grandes quantidades de resíduos de construção e demolição são produzidas a cada ano. Na verdade, a destinação destes resíduos estão se tornando um sério problema ambiental, especialmente para as principais cidades que não possuem locais de disposição (Aliabdo; Abd-Elmoaty; Hassan, 2014)

O tijolo cerâmico é considerado o segundo material de construção mais usado depois do concreto e é tratado como resíduo de construção e demolição, se houver danos durante as atividades de fabricação, construção e demolição. Na China, muitos prédios antigos foram demolidos nos últimos anos devido a atividades de reconstrução e as atividades de demolição criaram uma enorme quantidade de resíduos de tijolos, totalizando aproximadamente 0,4 bilhão de toneladas por ano (Wong et al., 2018).

Cerâmica como agregado para concretos

Segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), material cerâmico é classificado como classe A de entulho (resíduos recicláveis), podendo ser classificados e aproveitados como agregados miúdos e graúdos “areia e brita” para a indústria de construção civil. A reciclagem de entulho de obras de construções advém do objetivo de preservar o meio ambiente, suprimindo a demanda de novos materiais e dando destinação sustentável aos resíduos, que seriam descartados em aterros ou despejados de forma irregular a margens de rios e córregos.

Estudos realizados por (Cabral; Schalch; Molin, 2009) observaram que o concreto com agregado graúdo reciclado de cerâmica vermelha apresenta os maiores valores para o VPP, com acréscimo de 64% para 100% de substituição, quando comparado com o concreto de referência. Isto significa que o agregado graúdo reciclado de cerâmica vermelha propicia a formação de um concreto mais poroso, onde esses poros parecem estar mais interconectados.

Estudos foram realizados nos USA por (Caalline; Weggel, 2013) sobre o processo de britagem de agregados reciclados. Os mesmos devem atender a graduação das partículas, curva granulométrica adequada e, quando verificada que o processo de britagem produz agregado que não atendem a graduação granulométrica, é feita modificação na configuração do equipamento mecânico para produzir agregados que atendam a graduação desejada.

Estudos realizados por (Aliabdo; Abd-Elmoaty; Hassan, 2014), no uso de RCD-R proveniente de material cerâmico “tijolo de barro” como agregado graúdo e miúdo para adição em concretos, substituindo 50% e 100% dos agregados para produção de blocos de vedação. As resistências à compressão dos blocos de alvenaria de concreto alcançaram resultados satisfatórios de 5,2 MPa e 2,8 MPa.

Com base nos resultados apresentados por (Landolfo; Oliveira; Nogueira, 2014), observou-se que os agregados cerâmicos apresentam menores massas específicas e unitárias, do que as dos agregados naturais. Dessa forma, assim como descreve

(FONSECA, 2006), há a necessidade da compensação das massas de material reciclado para serem utilizados os traços de concreto, a fim de que não se obtenham diferenças muito grandes nos volumes dos materiais.

Os pesquisadores (Wong et al., 2018) relataram que a resistência do concreto poderia ser melhorada pela substituição parcial do cimento pelo pó de tijolos, que é obtido por britagem e posterior moagem das partículas de tijolos. É possível que isso resulte da composição química e à finura do pó de tijolo, o potencial de atividade pozolânica, e o efeito de enchimento dos poros do concreto. Embora o uso de resíduos de tijolos como agregados possa causar uma ligeira redução nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, há uma quantidade ideal de material cerâmico que pode ser incorporada ao concreto, garantindo que o concreto resultante atenda aos requisitos necessários para o seu objetivo.

Características do agregado cerâmico

A característica que determina os resultados da capacidade de absorção dos agregados cerâmicos reciclados é a quantidade de poros constituintes no agregado, e no caso do agregado cerâmico têm influência na qualidade da argila e temperatura de queima. A queima do material cerâmico é um dos fatores preponderantes na qualidade do material. A queima provoca a transformação do material argiloso e outras substâncias, provocando o fechamento dos poros na superfície do material cerâmico, e essa camada vitrificada depende da temperatura.

Segundo (Stroher et al., 2017), na comparação da composição granulométrica entre agregado natural brita e agregado reciclado de cerâmica triturado, o agregado graúdo reciclado demonstrou um módulo de finura abaixo do agregado natural.

Estudos realizados por (Landolfo; Oliveira; Nogueira, 2014) mostram que concretos confeccionados com agregados naturais de rocha calcária foram comparados com concretos com agregados reciclados cerâmicos no estado fresco, através do ensaio de abatimento de tronco de cone, onde verificou-se que a consistência e a trabalhabilidade são afetadas pelas características físicas dos agregados, tais como forma e textura (Silva; Geyer, 2018).

Algumas características dos agregados como textura, rugosidade e forma angulosa exercem influência negativa sobre a trabalhabilidade (Landolfo; Oliveira; Nogueira, 2014), uma vez que essas características das partículas lamelares têm a capacidade de provocar maior travamento, diminuindo a mobilidade entre as partículas da mistura de concreto (Silva; Geyer, 2018).

Estudos realizados por (Landolfo; Oliveira; Nogueira, 2014) relatam que a trabalhabilidade do concreto foi afetada pela grande capacidade de absorção dos agregados reciclados cerâmicos, sendo que este é um fator importante para o amassamento do concreto, uma vez que a retirada da água da mistura promovida pelo agregado altera algumas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, como a trabalhabilidade, resistência a compressão, módulo de elasticidade, e conseqüentemente, irá afetar o lançamento do concreto.

Os agregados cerâmicos são mais leves que os agregados normais, e o uso de concreto que incorpora agregados de tijolo podem reduzir significativamente o peso próprio de uma estrutura. Os agregados de tijolos têm o potencial de melhorar o desempenho térmico, quando expostos ao fogo, devido às suas propriedades de expansão térmica e condutividade (Aliabdp; Abd-Elmoaty; Hassan, 2014).

A composição do material cerâmico (tijolos, telhas) provem ser de diferentes locais e irá variar devido à mineralogia “fonte”, bem como os processos de queima utilizados. Além disso, as características do RCD-R produzido a partir de alvenaria de tijolo irão variar devido à idade da estrutura e características relacionadas ao projeto e construção (Cavalline; Weggel, 2013).

De acordo com (Brito; Perreira; Correia, 2005), demonstrou que a resistência à abrasão do concreto feito com agregados reciclados de cerâmica foi maior que a do concreto de referência com agregados de calcário. Os resultados mostram que existe um potencial para o uso destes agregados cerâmicos em elementos nos quais a exigência primária não é resistência à compressão, mas resistência à tração e resistência à abrasão, tais como lajes de pavimento de concreto.

Micro estrutura de concretos com agregados cerâmicos

O resíduo cerâmico britado não é considerado um material reciclável em grande parte do mundo, ao contrário do agregado de concreto reciclado, que é amplamente pesquisado. O primeiro uso de material cerâmico triturado utilizado em cimento Portland foi registrado na Alemanha, em 1860, mas o primeiro uso significativo de material cerâmico como agregados em concreto novo foi registrado para reconstrução após a Segunda Guerra Mundial (Aliabdo; Abd-Elmoaty; Hassan, 2014).

Estudos realizados por (Aliabdo; Abd-Elmoaty; Hassan, 2014) revelam que agregados cerâmicos reciclados foram incorporados ao concreto como agregados alternativos, agregados miúdos e graúdos, produzindo 24 traços de concretos, sendo 12 traços com 250 kg/m³ e 12 traços com 350kg/m³, com porcentagens de substituição de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% de agregado fino em volume e 0%, 25%, 50%, 75%, 100% de agregado graúdo. Todas as misturas mantiveram uma trabalhabilidade comparável (queda de 120 ± 10 mm). Um superplastificante tipo F (tipo naftaleno) foi usado em todas as misturas de concreto para garantir a trabalhabilidade.

Neste estudo, a análise da microestrutura dos poros nos concretos investigados com 25% de substituição de agregado fino reciclado de material cerâmico apresentou o menor tamanho de poro e a melhor estrutura de poros. Os pesquisadores (Aliabdo; Abd-Elmoaty; Hassan, 2014) atribuíram esse resultado aos hidratos adicionais produzidos pela reatividade pozolânica e possivelmente pela reidratação de partículas de cimento não-hidratadas em argamassa aderida, o que aumenta a densidade da matriz e refinam a estrutura do poro. Os autores acreditam que a presença de pó de tijolos de argila britados superfinos cobre os agregados finos e, portanto, melhora a zona de transição entre agregados e pasta de cimento. Além disso, a maior absorção de água do tijolo de argila britada aumenta a hidratação do cimento, uma vez que atua como agente de auto cura, o que leva a produtos de hidratação mais elevados.

Avanço tecnológico sobre o uso do material cerâmico no concreto

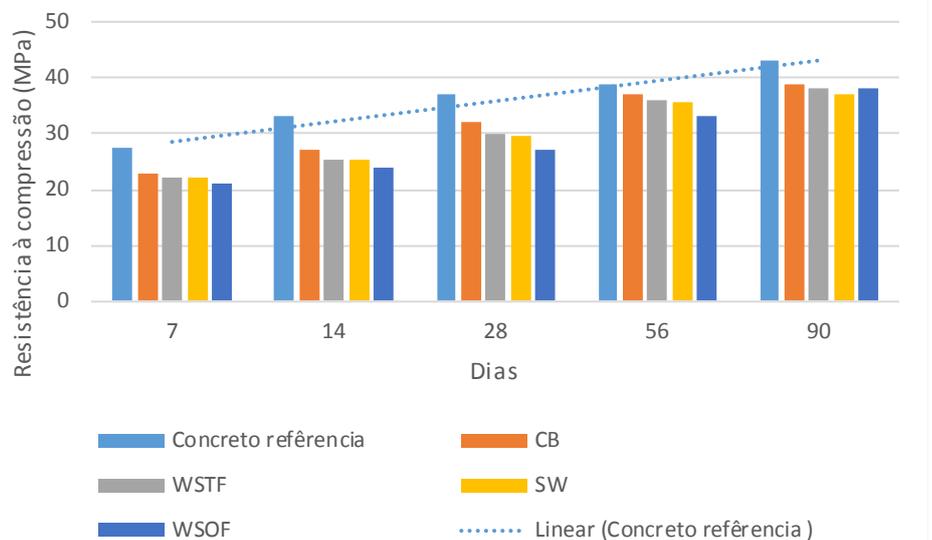
Substituição do cimento por pó de cerâmica vermelha para produção de concretos

Um dos componentes desejados para os materiais cerâmicos a serem usados como substitutos parciais de cimento, é a presença de reatividade “pozolânica”. As pozolanas são materiais com conteúdo silicoso e aluminoso amorfo que reagem com o hidróxido de cálcio na presença de água para formar hidratos de silicato de cálcio (CSH) e hidratos de silicato de alumínio (CASH) para melhorar as propriedades dos materiais à base de cimento (Afshinnia; Poursaee, 2015; Navrátilová; Rovnaníková, 2016)

A pozolanicidade de uma pozolana é governada pelos seus conteúdos ativos de sílica e alumina, bem como pela área superficial específica da pozolana. As pozolanas só podem ser consideradas muito ativas com alto mineral amorfo, enquanto o alto teor de mineral cristalino é considerado fraco em pozolanicidade (Rakhimova; Rakhimov, 2015; Walker; Pavía, 2011; Wong et al., 2018).

O processo de queima a temperaturas entre 500 e 900 °C provoca a desidroxilação do material cerâmico que ocorre em minerais argilosos “formação de metacaulim”, um material amorfo com forte reatividade e resulta em atividade pozolânica, “capacidade de reagir com hidróxido de cálcio e água para formar compostos cimentícios”. Assim, resíduos de tijolos de barro em pó podem ser usados em materiais à base de cimento, com benefícios ambientais da redução da quantidade de resíduos descartados e das emissões de CO₂ pelas indústrias de cimento. Uma grande variedade de argilas tem sido usada como materiais pozolânicos em argamassas e concreto como substituto parcial do cimento Portland. Eles geralmente contêm quantidades significativas de caulinita que são transformadas em metacaulinita após calcinação (Schackow et al., 2015).

Figura 1: Resistência a compressão dos concretos com pó cerâmico. Fonte: Adaptado de (Paccheco-Rorgal; Jalali, 2010).



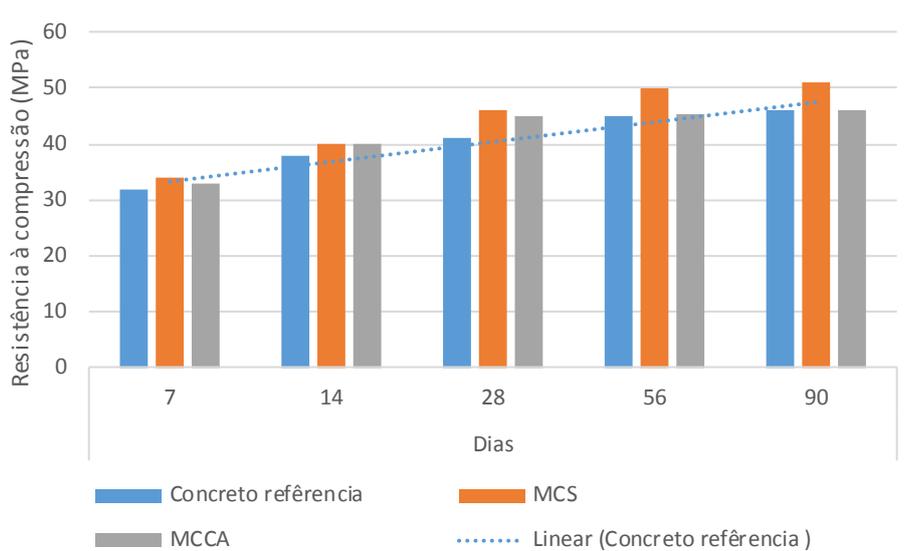


Figura 2: Resistência a compressão dos concretos Fonte: Adaptado de (Paccheco-Rorgal; Jalali, 2010).

Estudos realizados por (Paccheco-Rorgal; Jalali, 2010) apresentam resultados promissores sobre a utilização de pó cerâmico (reatividade pozolânica) como substituição do aglomerante. O presente trabalho estudou a substituição parcial de cimento por pó de cerâmica. Partículas de pós cerâmicos com tamanho de partícula $<75 \mu\text{m}$ foram selecionados para a substituição parcial de cimento. Os resultados mostram que o concreto com 20% de substituição de cimento, embora tenha uma pequena perda de resistência, possui maior durabilidade.

Quatro misturas com 20% de substituição de cimento por pó de cerâmica foram preparadas com resíduos de cerâmica: tijolos cerâmicos (CB); grés branco (WSTF); louças sanitárias (SW) e grés branco esmaltado duas vezes (WSOF). Para se obter uma comparação direta do concreto feito com agregado cerâmico reciclado e com concreto convencional, duas misturas correspondentes foram preparadas, uma substituindo areia natural por areia cerâmica (MCS) e outra com agregado graúdo de granito substituído por agregado graúdo de cerâmica (MCCA) (Paccheco-Rorgal; Jalali, 2010).

Em estudos realizados por (Paccheco-Rorgal; Jalali, 2010) com substituição de agregados graúdos naturais e miúdo por agregados cerâmicos, apresentaram resultados promissores, como mostra a Figura 2. O concreto com substituição de agregado cerâmico graúdo (MCCA) e areia cerâmica "agregado miúdo" (MCS) foram comparados com o concreto de referência com agregado natural rochoso. Os pesquisadores (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2010) atribuíram este comportamento devido ao fato de que os agregados cerâmicos são usados em um estado pré-saturado, fornecendo água para a hidratação do cimento.

Os resultados mostram que o concreto com substituição do cimento por pó de resíduo cerâmico, embora tenha uma pequena perda de resistência, possui um aumento no desempenho de durabilidade devido às suas propriedades pozolânicas. Os resultados

também mostram que a substituição da areia tradicional por areia cerâmica é uma boa opção, pois não implica em perda de resistência e tem um desempenho de durabilidade superior. Quanto à substituição de agregados graúdos tradicionais por agregados graúdos de cerâmica, os resultados são promissores, mas apresentam desempenho inferior na absorção de água e na permeabilidade à água, o que significa que a substituição da areia tradicional por areia cerâmica é uma opção melhor (Paccheco-Rorgal; Jalali, 2010).

Os resultados mostram que o concreto com substituição do cimento por pó de resíduo cerâmico, embora tenha uma pequena perda de resistência, possui um aumento no desempenho de durabilidade devido às suas propriedades pozolânicas. Os resultados também mostram que a substituição da areia tradicional por areia cerâmica é uma boa opção, pois não implica em perda de resistência e tem um desempenho de durabilidade superior. Quanto à substituição de agregados graúdos tradicionais por agregados graúdos de cerâmica, os resultados são promissores, mas apresentam desempenho inferior na absorção de água e na permeabilidade à água, o que significa que a substituição da areia tradicional por areia cerâmica é uma opção melhor (Paccheco-Rorgal; Jalali, 2010).

Pesquisas (O'Farrel; Sabir; Wild, 2006; Olofinnade et al., 2016; Toledo et al., 2007) descobriram que, a inclusão de pó de tijolos de até 10 a 20% de substituição de cimento no concreto, pode resultar em resistência compatíveis com concretos de referência, que em seus estudos promoveram a formação de géis CSH como resultado de uma possível reação pozolânica (Naceri; Hamina, 2009). Consequentemente, uma microestrutura mais densa do concreto pode ser formada. Pesquisadores (Lin et al., 2010) também revelaram que os géis secundários de CSH formados tiveram um certo efeito de refinamento de poros, como observado a partir da relação gel-espacamento semelhante a pasta de cimento misturada com pó de tijolo (concreto de referência). Isso elevou a resistência à compressão dos concretos investigados no estudo. Além disso, a reatividade pozolânica do pó do material cerâmico, concreto e argamassas contendo o teor ideal de 20% de pó cerâmico geralmente exibiam maior ganho de resistência em períodos prolongados em comparação ao de referência (O'Farrel; Sabir; Wild, 2006).

Estudos foram realizados por (Toledo et al., 2007) sobre o potencial uso do pó cerâmico calcinado como substituição parcial do cimento Portland, para produção de argamassas de concreto, nas proporções de 10%, 20%, 30% e 40%, que submetidos aos ensaios mecânicos, análise da porosidade e testes de durabilidade. Os resultados indicaram que as porcentagens ótimas de substituição estão entre 10% e 20%.

Concretos com agregados reciclados cerâmicos

Estudos realizados por (Cavalline; Weggel, 2013), indicaram que concreto com resistências à compressão aceitáveis podem ser produzidos usando agregados graúdo cerâmicos como substituição de até 100% do agregado graúdo natural. Considerando as exigências de dosagens para resistência descritas na ACI 318. Na proposta da pesquisa foram substituídos 100% os agregados naturais por agregados reciclados cerâmicos e utilizados quatro métodos diferentes de dosagens. Os traços realizados produziram concretos com resistência compatível com concretos com agregados convencionais e resistência aos 28 dias de idade de 25.3 MPa, 44.8 MPa, 36.6 MPa, 44.5 MPa.

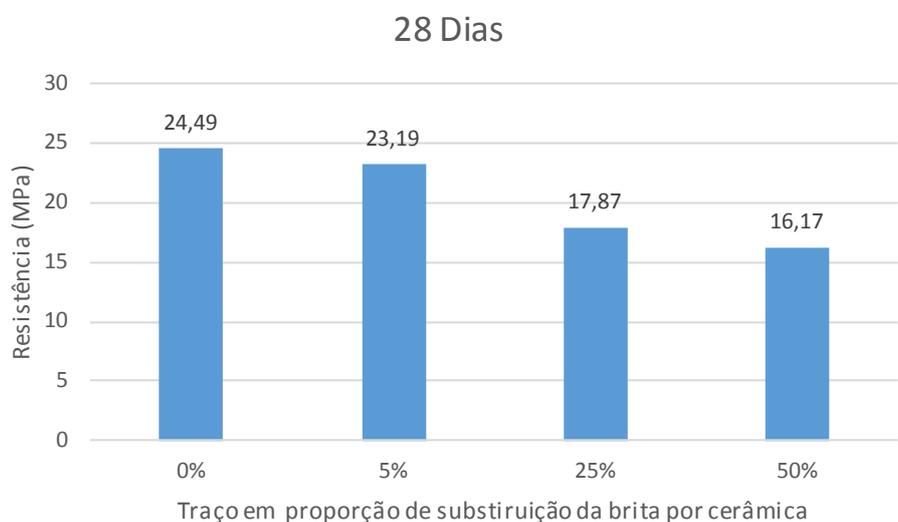
Em estudos realizados por (Stroher et al., 2017) propõem a substituição de agregado natural por agregado reciclado cerâmico em 0%, 5%, 25% e 50%, para produção de concreto. Verificou-se a trabalhabilidade do concreto fresco, obtendo um rebaixamento da massa variando de 4 a 4,5 cm, comparado ao concreto de referência. Para a resistência à compressão, os ensaios apresentaram resistência de 28,34 MPa, 26,79 MPa, 22,17 MPa, 19,44 MPa aos 28 dias de idade e obtiveram bons resultados, que foram superiores à resistência exigida pela norma de concreto estrutural de 20 Mpa para concretos estruturais.

Estudos realizados na Espanha por (García et al., 2015), sobre o uso de resíduos de cerâmica usados como componente em concreto, demonstraram a viabilidade de empregar resíduos da indústria de louças sanitárias como agregado graúdo em substituição ao agregado natural usado para produção de concretos em até 100%. Obtiveram resistência à compressão aos 28 dias de 33,39 MPa para o concreto convencional e 33,35 MPa para o concreto com 100% de agregado cerâmico de louça branca.

Um estudo comparativo da substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo cerâmico em concretos, foi realizado por (Landolfo; Oliveira; Nogueira, 2014). Foram produzidos cinco traços sendo: 100% ARCV – agregado reciclado de cerâmica vermelha, 100% BC – Brita calcária, 100% BG – Brita Granítica, 50% ARCV/BC, 50% ARCV/BG, para análise e comparação dos resultados. Os resultados dos ensaios apresentaram as seguintes resistências: 25,98 MPA, 29,58 MPa, 33,91 MPa, 29,60 MPa e 26,79 Mpa, aos 28 dias de idade. O concreto com 100% de agregado cerâmico apresentou resistências 23,38% menor que o concreto com 100% BG, e para o concreto com 50% ARCV/BG, apresentou resistência de 12,73% menor que 100 BG.

A fim de investigar o uso de agregado de alvenaria britada como o agregado graúdo no concreto, (Khalaf, 2006) realizou estudos comparando estes concretos com concretos produzidos com agregado granítico. Em geral, os agregados de tijolos britados produziram concreto de resistência normal, com uma resistência aceitável, porém, um dos concretos produzidos com agregado cerâmico obtiveram resistência além da

Figura 3: Resistência dos diferentes concretos Fonte: Adaptado de (Stroher et al., 2017).



% de substituição	Média da resistência à compressão axial (MPa)	
	7 dias	28 dias
100% de ARCV	19,93	25,98
100% de BC	21,83	29,58
100% de BG	24,54	33,91
50% de ARCV-BC	18,49	29,6
50% de ARCV-BG	24,08	26,79

Tabela 1: Resistência à compressão com 7 e 28 dias. Resistência a compressão dos traços ARCV, BC, BG, ARCV-BC e ARCV-BG. Fonte: Adaptado de (Landolfo; Oliveira; Nogueira, 2014).

média dos concretos de 43 MPa aos 28 dias, e superior ao concreto de referência. Isso é muito encorajador e confirma que os tijolos britados utilizados hoje podem ser usados na produção de concreto de alta qualidade. No entanto, é claro que alguns agregados de tijolos produzem concreto mais forte do que outros. Os resultados da resistência para o concreto com agregado de tijolos foram condizentes com os valores de resistência registrados para o concreto de referência.

Conclusão

Um dos principais fatores que influenciam as propriedades mecânicas do concreto com agregados naturais e agregados reciclados, é a capacidade de absorção de água destes materiais, e que está relacionada ao índice de porosidade do concreto. Esta propriedade está intimamente relacionada com as características dos agregados como: forma, textura, densidade, massa unitária e massa específica.

A alta absorção provocada pelo agregado reciclado, prejudica a trabalhabilidade do concreto, fato provocado pelo elevado índice de poros existente no agregado reciclado e na argamassa aderida ao agregado reciclado. No agregado reciclado, a argamassa aderia secciona (puxa) parte da água utilizada no amassamento e utilizada para hidratação do aglomerante, não permitindo que a água utilizada para dosagem seja suficiente para hidratar 100% do aglomerante. Este fato contribui para que resulte elemento em fase anidra na composição do concreto (aglomerante não hidratado na micro estrutura do concreto).

Pesquisas realizadas sobre o uso do potencial de substituição de materiais cerâmicos reciclados, como agregado graúdo e miúdo no concreto, são uma alternativa que nos possibilita um planejamento para o ciclo produtivo na indústria da construção. O objetivo é fechar o ciclo, gerando novos produtos com matérias primas secundárias produzidas a partir de resíduos da construção, resíduos que seriam descartados, e que possuem valor agregado para uso na construção. Assim a construção deixaria de extrair materiais não renováveis e teria um menor impacto na paisagem.

Várias pesquisas apresentam resultados satisfatórios para a comunidade científica, contudo, o agregado cerâmico é comparativamente mais frágil e mais poroso que o agregado natural rochoso. A maioria das investigações dos estudos analisados abordam as resistências mecânicas, nos parâmetros mais importantes utilizados no concreto. Pesquisas apontam que o uso de agregado alternativo geralmente aumenta a durabilidade do concreto. Portanto, pode-se constatar que a literatura também se concentra na investigação de algumas das propriedades relacionadas à durabilidade, como o encolhimento, a resistência ao ataque químico.

Para a influência da substituição parcial do cimento por pó de cerâmica vermelha moída, e sua influência sobre as propriedades mecânicas do concreto fresco e endurecido, os resultados são promissores, porém, requerem estudos mais aprofundados.

Referências bibliográficas

- AFSHINNIA, K.; POURSAEE, A. The potential of ground clay brick to mitigate Alkali-Silica Reaction in mortar prepared with highly reactive aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 95, p. 164–170, 22 jul. 2015.
- AKHTARUZZAMAN, A. A.; HASNAT, A. Properties of Concrete Using Crushed Brick as Aggregate. *Concrete International*, v. 5, n. 2, p. 58–63, 1983.
- ALIABDO, A. A.; ABD-ELMOATY, A. E. M.; HASSAN, H. H. Utilization of crushed clay brick in concrete industry. *Alexandria Engineering Journal*, v. 53, n. 1, p. 151–168, mar. 2014.
- AMORIM, P.; BRITO, J. DE. Concrete Made With Coarse Concrete Aggregate. *ACI Materials Journal*, v. 109, n. March, p. 195–204, 2012.
- ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade. *IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, p. 1613–1624, 2002.
- BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. *Cerâmica*, v. 61, n. 358, p. 178–189, 2015.
- CABRAL, A.; SCHALCH, V.; MOLIN, D. D. Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha (Performance of red ceramic recycled aggregate concrete). *Cerâmica*, v. 55, p. 448–460, 2009.
- CAVALLINE, T. L.; WEGGEL, D. C. Recycled brick masonry aggregate concrete: Use of brick masonry from construction and demolition waste as recycled aggregate in concrete. *Structural Survey*, v. 31, n. 3, p. 160–180, 5 jul. 2013.
- CONAMA. CONAMA 307/2002 - *Gestão de Resíduos Sólidos* (Construção Civil), 2002.
- DE BRITO, J.; PEREIRA, A. S.; CORREIA, J. R. Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. *Cement and Concrete Composites*, v. 27, n. 4, p. 429–433, abr. 2005.
- EVANGELISTA, L.; DE BRITO, J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, n. 1, p. 9–14, 2010.
- FONSECA, A. P. Estudo comparativo de concretos com agregado graúdo reciclado de telha cerâmica e agregado graúdo natural. [s.l.] *Dissertação* - Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- GARCÍA-GONZÁLEZ, J. et al. Ceramic ware waste as coarse aggregate for structural concrete production. *Environmental Technology* (United Kingdom), v. 36, n. 23, p. 3050–3059, 2 dez. 2015.

- GOMES, M.; DE BRITO, J. Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates. *Portugal Sb07- Sustainable Construction, Materials and Practices: Challenge of the Industry for the New Millennium*, Pts 1 and 2, p. 887–894, 2007.
- HANSEN, T. C. *Recycling of Demolished Concrete and Masonry*. [s.l.: s.n.]. v. 3
 _____. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985. *Materials and Structures*, v. 19, n. 3, p. 201–246, 1986.
- KHALAF, F. M. Using Crushed Clay Brick as Coarse Aggregate in Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 18, n. 4, p. 518–526, 24 jul. 2006.
- LANDOLFO, R.; OLIVEIRA, M. P. DE; NOGUEIRA, N. A. de S. Estudo Comparativo da Utilização de Resíduo Cerâmico, como Agregado Graúdo, na Produção de Concreto. *Cerâmica Industrial*, v. 19, n. 5, p. 35–41, 2014.
- LEITE, M. B. *Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concreto Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção*. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mar. 2001.
- LIN, K. L. et al. Waste brick's potential for use as a pozzolan in blended Portland cement. *Waste Management and Research*, v. 28, n. 7, p. 647–652, 2010.
- NACERI, A.; HAMINA, M. C. Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. *Waste Management*, v. 29, n. 8, p. 2378–2384, ago. 2009.
- NAGATAKI, S. et al. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 6, p. 965–971, 2004.
- NAVRÁTILOVÁ, E.; ROVNANÍKOVÁ, P. Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, 1 set. 2016.
- O'FARRELL, M.; SABIR, B. B.; WILD, S. Strength and chemical resistance of mortars containing brick manufacturing clays subjected to different treatments. *Cement and Concrete Composites*, v. 28, n. 9, p. 790–799, out. 2006.
- OLOFINNADE, O. M. et al. Structural Properties of Concrete Containing Ground Waste Clay Brick Powder as Partial Substitute for Cement. *Materials Science Forum*, v. 866, p. 63–67, 11 ago. 2016.
- PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 5, p. 832–838, maio 2010.
- POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 18, n. 6, p. 461–468, 2004.
- RAKHIMOVA, N. R.; RAKHIMOV, R. Z. Alkali-activated cements and mortars based on blast furnace slag and red clay brick waste. *Materials and Design*, v. 85, p. 324–331, 15 nov. 2015.
- SCHACKOW, A. et al. Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars. *Cement and Concrete Composites*, v. 62, p. 82–89, 26 jun. 2015.
- SENTHAMARAI, R. M.; DEVADAS MANOHARAN, P. Concrete with ceramic waste aggregate. *Cement and Concrete Composites*, v. 27, n. 9–10, p. 910–913, out. 2005.
- SILVA, D. DE A. Estudo da Influência do Índice de Forma do Graúdo nas Propriedades Mecânicas do Concreto. [s.l.] *Dissertação de (Mestrado)* - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2012.
- SILVA, D. DE A.; GEYER, L. B. Influência da forma do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, v. 05, n. 12, p. 67–82, 2018.

STROHER, A. P. et al. Utilização da cerâmica de entulho na substituição de agregado graúdo do concreto. *Cerâmica Industrial*, v. 22, n. 4, p. 34–46, 2017.

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 6, p. 1195–1203, jun. 2005.

TOLEDO FILHO, R. D. et al. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 9, p. 1357–1365, 2007.

WALKER, R.; PAVÍA, S. Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime-pozzolan pastes. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 44, n. 6, p. 1139–1150, jul. 2011.

WONG, C. L. et al. Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review. *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, , 10 set. 2018.

Recebido [Set. 09, 2019]

Aprovado [Nov. 30, 2020]