Análise bibliográfica do uso de adições pozolânicas e métodos de mistura modificados em concretos de agregados reciclados

Guilherme Victor de Oliveira Alves [(1)]; Flávia Spitale Jacques Poggiali [(2)]; Rogério Cabral de Azevedo [(3)]

(1) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – guilhermevictoralves2@gmail.com; (2) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – flaviaspitale@gmail.com; (3) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – rogerio@civil.cefetmg.br

RESUMO

A crescente demanda por agregados naturais, a diminuição de suas reservas, o aumento na geração de resíduos de construção civil (RCC) e o descarte desses detritos têm se tornado importantes questões econômicas e ambientais. A reciclagem dos RCC na forma de agregados graúdos reciclados (AGR) utilizados em concretos é uma alternativa para mitigar os problemas relacionados à sua disposição e ao aumento da pressão sobre agregados naturais. A utilização dos AGR, no entanto, prejudica as propriedades do compósito. Modificações nos métodos de mistura de concreto e adições de materiais pozolânicos podem vir a mitigar o problema, melhorando a performance dos concretos de agregados reciclados, contribuindo para maior aceitação e emprego do material. Utilizando a metodologia ProKnow-C (*Knowledge Development Process – Constructivist*), foi montado um portfólio que constitui o estado da arte acerca de métodos de mistura modificados e adições pozolânicas em concretos produzidos com diferentes níveis de AGR. Foi realizada uma análise quantitativa e qualitativa do efeito do uso de métodos de mistura modificados e adições pozolânicas, identificando quais os métodos e adições mais eficientes. Após análise, foi verificado que os métodos que utilizam sílica ativa, misturada encapsulando os AGR, proporcionam maiores ganhos de resistência à compressão aos concretos de agregados reciclados.

Palavras-chave: concreto de agregados reciclados, pozolanas, método de mistura, ProKnow-C

Bibliographic analysis of the use of pozzolanic additions and modified mixing methods in recycled aggregate concretes

ABSTRACT

The growth in demand for natural aggregates, their diminishing reserves, the increased generation of construction waste and the disposal of this waste have become important economic and environmental matters. Recycling construction waste as coarse recycled aggregates in concretes is an alternative to mitigate the issues related to their disposal and the increasing pressure on natural aggregates. However, the use of recycled aggregates in concrete jeopardizes its performance. Modified concrete mixing approaches and the use of pozzolanic materials may lessen the issue, improving the performance of recycled aggregate concretes, contributing to a greater acceptance and use of the material. Using the ProKnow-C (Knowledge Development Process – Constructivist) methodology, a state-of-the-art research portfolio concerning modified mixing methods and pozzolanic additions to recycled aggregate concretes was assembled. A qualitative and quantitative analysis about pozzolanic additions and mixing methods was performed, identifying which are the most effective mixing methods and pozzolan additions. After the analysis, it was pointed that mixing methods with addition of silica fume enveloping the recycled aggregates improved the concrete's compression performance the most.

Key-words: recycled aggregate concrete, pozzolans, mixing method, ProKnow-C

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é responsável por grande parte dos resíduos destinados a aterros no mundo e por até 30% das emissões anuais de gases do efeito estufa, como dióxido de carbono [1,2]. Apenas a produção de cimento é responsável por 5% das emissões globais de CO_2 [3]. Uma das maneiras de mitigar o impacto ambiental associado ao setor é reduzir o consumo de cimento em traços de concreto por meio de sua substituição parcial por materiais pozolânicos [4].

Os resíduos da construção civil (RCC), originados por atividades produtivas do setor, são, em sua maior parte, destinados a aterros ou dispostos ilegalmente. Sua relevância tem aumentado, frente à escassez de terrenos para aterros e à alta demanda mundial por agregados naturais, fazendo com que sejam considerados um recurso em potencial para diversos propósitos. Apesar de influenciarem o comportamento do concreto de maneira negativa, é possível reciclá-los e utilizá-los como agregados. À porção graúda dos RCC utilizados como agregados em concretos dá-se o nome de agregados graúdos reciclados (AGR) [5–7].

Os AGR possuem pior qualidade quando comparados aos agregados graúdos naturais (AGN), especialmente devido à sua camada de argamassa aderida e à fraca zona de transição interfacial (ZTI) entre agregado original e camada de argamassa. O concreto de agregados reciclados possui duas ZTI, uma entre a nova matriz de cimento e agregado reciclado e a outra entre agregado reciclado e a argamassa antiga a ele aderida. As ZTI são pontos fracos no concreto de agregados reciclados, contribuindo para o pior desempenho do material, comparado ao concreto de agregados naturais [6,8–15]. Métodos para aprimorar as propriedades dos AGR têm sido desenvolvidos, consistindo em remover a argamassa aderida ao agregado original ou modificá-la, melhorando suas propriedades [16,17]. O uso de materiais pozolânicos e de métodos de mistura modificados são tratamentos de baixo custo associado, capazes de melhorar a microestrutura do concreto de agregados reciclados, possibilitando-o atingir resistência mecânica e durabilidade equiparáveis a concretos produzidos com uso de agregados naturais [18–24].

O presente estudo visa selecionar e, posteriormente, analisar um portfólio acerca de métodos de mistura e adições pozolânicas em concretos de agregados reciclados, identificando os efeitos de tais tratamentos nas propriedades mecânicas e na microestrutura de concretos de agregados reciclados. Para seleção e análise de artigos, utilizou-se o método de análise sistêmica ProKnow-C.

2. METODOLOGIA

2.1. Enquadramento metodológico

O enquadramento metodológico de um estudo depende do assunto abordado, seus objetivos e os meios utilizados para obtenção de dados. O enquadramento metodológico da presente pesquisa considera os seguintes aspectos: natureza, método de abordagem, objetivos, procedimentos técnicos e instrumentos de pesquisa [25–27]. Sua classificação é mostrada na Tabela 1:

Tabela 1 - Enquadramento metodológico do estudo

Aspecto da pesquisa	Classificação da pesquisa
Natureza	Aplicada
Método de abordagem	Qualitativa e quantitativa
Objetivos	Exploratória
Instrumento de pesquisa	Proknow-C
Procedimentos técnicos	Bibliográfica

2.2. Procedimento para seleção e filtragem de artigos

Para realização desta pesquisa foi adotado o método de revisão sistêmica ProKnow-C, possibilitando a seleção e analise de um portfólio bibliográfico de artigos que abordem os efeitos do uso de métodos de mistura alternativos e adições pozolânicas em concretos fabricados com resíduos de construção e demolição, utilizados como agregados reciclados [28]. Com o tema da pesquisa definido, foram adotadas seis palavras-chave: "*Recycled aggregate concrete*" (PC1), "*Recycled aggregate*" (PC2), "*Interfacial Transition Zone*" (PC3), "*Mixing Method*" (PC4), "SCM" ("*Suplementary cementing materials")* (PC5), "*Microstructure*" (PC6). As mesmas foram agrupadas em grupos de três, totalizando 20 combinações. Foram pesquisadas cinco bases, com acesso disponível pelo portal de periódicos CAPES [29], retornando 4196 artigos. Conforme mostrado na Tabela 2:

Tabela 2 - Bases de busca e artigos retornados

Bases de busca	Artigos retornados
Science Direct	2138
Technology Collection	894
Web of Science	490
Scopus	366
Compendex	308
Total	**4196**

Foi realizada uma filtragem do portfólio com auxílio do gestor de referências Mendeley Desktop, eliminando duplicatas, livros e reedições de artigos. O material selecionado, denominado portfólio bibliográfico, foi reduzido a 1598 artigos. Foram então lidos os títulos dos artigos do portfólio, verificando sua adequabilidade ao tema proposto pela pesquisa, identificando 61 artigos com título totalmente alinhado ao tema. Em sequência, foi realizada a filtragem do portfólio por relevância acadêmica. Por meio do Google Acadêmico, foram buscadas e contabilizadas as citações de cada um dos 61 artigos. O ponto de corte para permanência no portfólio foi estabelecido em 85% do total das citações, sobrando 23 artigos. Os 23 artigos tiveram seus resumos analisados, 7 foram descartados, permanecendo 16. Foi realizada uma análise dos trabalhos presentes no portfólio inicial com datas recentes, que pertencem a autores já incluídos no portfólio e que não foram selecionados na etapa de relevância acadêmica. Foram adicionados 8 artigos, resultando na leitura integral de 24. Após leitura, 12 foram descartados por não se alinharem ao tema de pesquisa. Os 12 artigos selecionados que constituem o portfólio bibliográfico final são apresentados na Tabela 3:

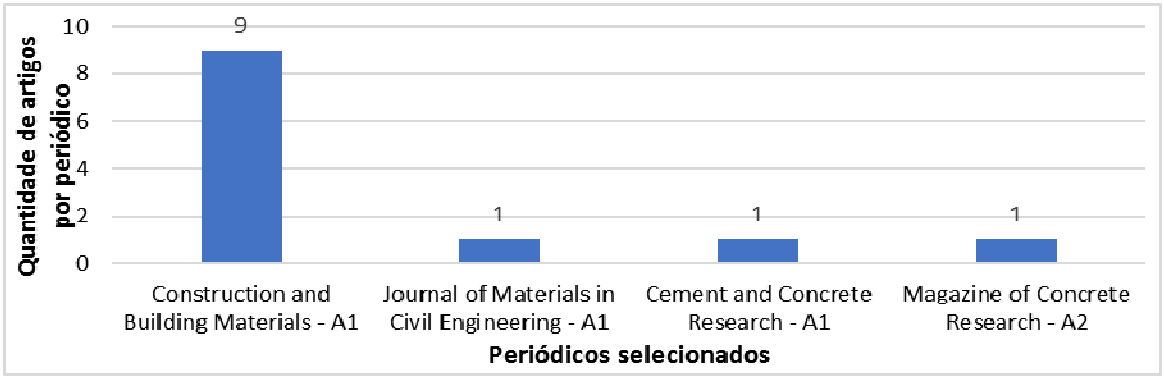
Tabela 3 - Artigos selecionados para o portfólio final (ordem cronológica)

Autores	Título do artigo e referência
Otsuki *et al.*, (2003)	Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete [30].
Tam *et al.*, (2005)	Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach [21].
Tam *et al.*, (2006)	Comparing Performance of Modified Two-Stage Mixing Approach for Producing Recycled Aggregate Concrete [31].
Tam *et al.*, (2008)	Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMAs and TSMAsc [23].
Li *et al.*, (2009)	Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete [20].
Corinaldesi *et al.*, (2009)	Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete [32].
Kong *et al.*, (2010)	Effect and mechanism of surface-coating pozzalanics materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete [19].
Abd Elhakam *et al.*, (2012)	Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete [18].
Li *et al.*, (2012)	Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches [33].
Brand *et al.*, (2015)	Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete [34].
Rajhans *et al.*, (2018)	Sustainable self compacting concrete from C&D waste by improving the microstructures of concrete ITZ [35].
Zhang *et al.*, (2019)	Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete [36].

2.3. Análise bibliométrica do portfólio

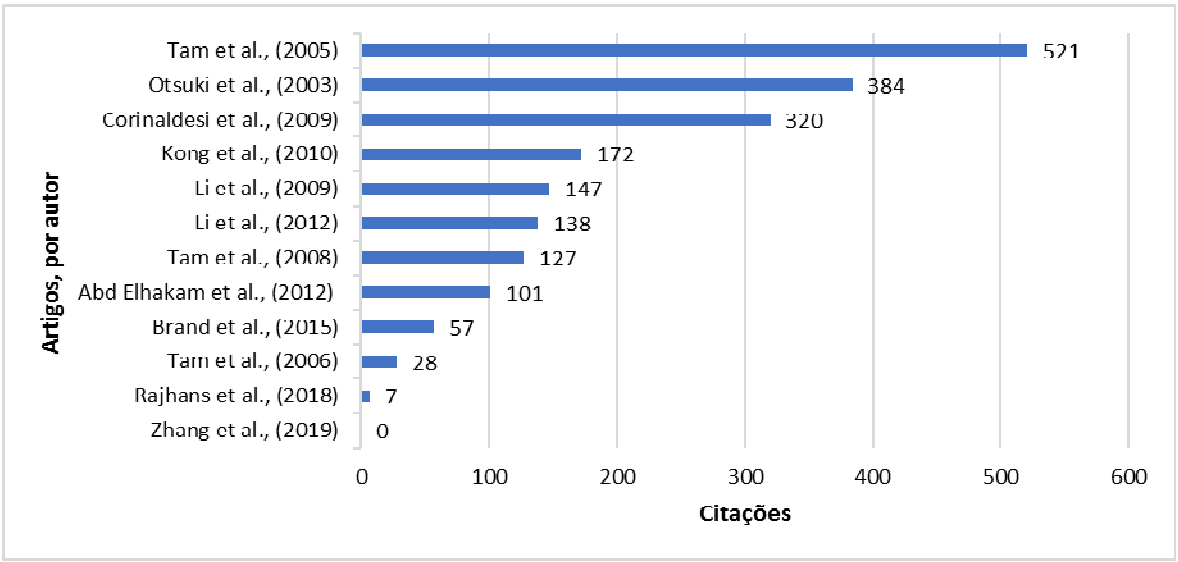
A análise bibliométrica do portfólio estima a relevância dos artigos selecionados e os periódicos onde foram publicados. A quantidade de artigos pertencentes a cada periódico e sua classificação, segundo o sistema Qualis-Capes [29], é mostrada pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.**. Destaca-se, contribuindo para justificar a relevância do portfólio obtido, que dos quatro periódicos que englobam o portfólio, três são classificados pela CAPES como A1 e um é classificado como A2.

Figura 1 - quantidade de artigos por periódico e classificação dos periódicos



A análise de relevância acadêmica dos artigos selecionados é ilustrada pela Figura 2 e foi realizada com auxílio do Google Acadêmico, por meio da contagem de citações, desde o momento de sua publicação até a data em que esta etapa foi conduzida:

Figura 2 - Relevância do portfólio por reconhecimento acadêmico



2.4. Análise sistêmica dos artigos selecionados

A análise sistêmica do portfólio procura analisar cada artigo sob a ótica de lentes de pesquisa, identificando lacunas e oportunidades para novas pesquisas, destacando os principais pontos do portfólio. Foram definidas as lentes de pesquisa, conforme Tabela 4 e, em seguida, foi realizada a análise do conteúdo dos 12 artigos selecionados.

Tabela 4 - Lentes de pesquisa adotadas

Lente	O que busca
Métodos de mistura de concretos de agregados reciclados	Identificar os métodos de mistura de concreto utilizados pelos artigos e seus efeitos nas propriedades do concreto.
Níveis substituição de AGN por AGR	Listar níveis de substituição de AGN por AGR.
Propriedades avaliadas	Relatar os ensaios conduzidos pelo estudo.
Uso de materiais pozolânicos como adição ao concreto	Identificar as adições utilizadas, os níveis de adição e seus efeitos nas propriedades do concreto.

2.5. Aspectos abordados pelo portfólio

O estudo de Otsuki *et al*., (2003) [30] buscou avaliar a influência do uso de 100% de AGR na zona de transição interfacial, resistência mecânica, resistência à penetração de cloretos e à carbonatação de concretos, propondo, para melhoria de tais propriedades, um método de mistura duplo, denominado *Double Mixing Approach* (DM). O método consiste em adicionar a água de mistura do traço em dois momentos distintos: em uma primeira etapa, junto aos agregados miúdos e graúdos, e posteriormente, após os outros componentes do concreto serem colocados. A resistência à compressão e à tração (28 dias) foram melhoradas em 12,9% e 22,2%, respectivamente, comparando-se a concretos produzidos pelo método de mistura convencional, ou *Normal Mixing Approach* (NMA). A resistência à penetração de íons cloreto foi melhorada em 22,7% e a resistência à carbonatação em 12,3% [30].

Tam *et al*., (2005) [21] elaboraram um método de mistura semelhante proposto por Otsuki *et al*., (2003) [30], nomeado *Two Stage Mixing Approach* (TSMA), adicionando água à mistura de concreto em duas etapas distintas. A primeira metade da água é utilizada na formação de uma fina camada de cimento na superfície dos agregados miúdos e graúdos, permeando os poros da superfície dos AGR e preenchendo vazios e fissuras. A água restante é adicionada em uma segunda etapa. Foram produzidos concretos com 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de AGR, por meio do TSMA e do NMA, o último sendo utilizado como referência. Os concretos tiveram sua microestrutura e resistência à compressão avaliadas. O emprego do TSMA proporcionou o fortalecimento das ZTI, melhorando a resistência à compressão aos 28 dias em até 21,19%, em comparação ao traço de referência [21].

Tam *et al.*, (2006) [31] e Tam *et al.*, (2008) [23] elaboraram quatro métodos de mistura distintos, derivados do TSMA, utilizando o mesmo traço de concreto que a pesquisa de Tam *et al.*, (2005) [21] e agregados reciclados de mesma origem. Os estudos de 2006 e 2008 avaliaram misturas de concreto com teores de 5, 10, 15, 20, 30 e 35% de AGR, produzidas pelos métodos propostos e comparadas a traços de referência, produzidos segundo o NMA [21,23,31].

Os procedimentos oriundos do estudo de Tam *et al.*, (2006) [31] são denominados TSMAp1 (proporcional 1) e TSMAp2 (proporcional 2). Os métodos diferem do TSMA por utilizarem uma camada de pasta de cimento para cobrir apenas a superfície dos AGR durante a primeira etapa da mistura, enquanto o TSMA utiliza a pasta de cimento para cobrir agregados miúdos, agregados graúdos naturais e AGR. Durante a primeira etapa, o TSMAp1 adiciona cimento e água aos agregados graúdos, enquanto o TSMAp2, na mesma parte do processo, adiciona apenas cimento aos agregados graúdos, formando uma camada de pasta de cimento com menor quantidade de água ao redor dos AGR, comparado ao TSMAp1. As misturas foram avaliadas segundo a resistência à compressão aos 28 dias, módulo de elasticidade e microestrutura. Com uso do TSMAp1 e do TSMAp2 foram alcançadas melhoras na resistência à compressão aos 28 dias de até 11,47% e 19,75%, respectivamente, e de até 16,48% e 13,19% no módulo de elasticidade, comparando-se ao traço produzido pelo NMA. O TSMAp2 apresentou melhores resultados que o TSMAp1, o que, segundo os autores, deu-se devido ao menor fator a/c na zona de transição interfacial entre agregados reciclados e nova matriz cimentícia [31].

Tam *et al.*, (2008) [23] propuseram o TSMAs e o TSMAsc, adicionando material pozolânico ao concreto de agregados reciclados e dividindo em partes a água de mistura. O primeiro processo adiciona apenas 2% de sílica ativa, em peso do cimento, misturada aos agregados reciclados em um processo de pré mistura do concreto. O segundo método adiciona cimento e 2% de sílica ativa durante a mesma etapa. Os traços produzidos foram avaliados segundo módulo de elasticidade, microestrutura, resistência à compressão, flexão e tração por compressão diametral e comparados a um concreto de referência, produzido pelo NMA. As resistências à tração e à flexão e o módulo de elasticidade foram melhorados. A resistência à compressão foi aprimorada em até 19,5% e 19,73% com uso do TSMAs e o TSMAsc, respectivamente. Os métodos proporcionaram aos AGR serem cobertos por camadas de sílica ativa, diminuindo a porosidade da ZTI, aumentando sua densidade e a aderência entre AGR e pasta de cimento, resultando eu uma melhor microestrutura [23].

Li *et al.*, (2009) [20] continuaram a avalição do uso de adições pozolânicas ao concreto de agregados reciclados, utilizando-as de maneira a encapsular os AGR. Parte da água do traço é misturada às

adições, formando uma pasta com fator a/c relativamente baixo. Os AGR são então imersos e envoltos pela pasta, para serem agitados. São adicionados, em sequência, os demais componentes do concreto. Os autores deram o nome de *Stone Enveloped with pozzolanic powder* (SEPP) ao método de mistura proposto, produzindo traços de concreto com 100% de AGR, substituindo 10 e 20% do cimento, em peso, por cinzas volantes, sílica ativa e/ou escória de alto-forno. Avaliaram-se trabalhabilidade, microestrutura (por meio de MEV) e resistência à compressão e à flexão dos concretos produzidos, utilizando diferentes métodos de mistura (SEPP e NMA), níveis e tipos de adições. O uso do SEPP combinado às adições pozolânicas proporcionou ao concreto atingir níveis satisfatórios de trabalhabilidade e aprimorou, em até 45,40% e 30,54%, as resistências à compressão e flexão, respectivamente. A microestrutura do material foi melhorada, obtendo-se uma ZTI mais densa entre agregado e pasta de cimento, comparando-se ao traço de referência, produzido pelo NMA. Os melhores resultados de resistência à compressão foram obtidos para o concreto com adição de 10% de sílica ativa e 10% de cinzas volantes, produzidos pelo SEPP [20].

Elhakam *et al*., (2012) [18] produziram concretos com níveis de 25, 50, 75 e 100% de AGR, avaliando o efeito de três técnicas para melhora das propriedades do produto: método de auto-cura, método de mistura TSMA e adição de 10% de sílica ativa em peso do cimento, utilizada de maneira a encapsular os AGR, como conduzido por Li *et al*., (2009) [20]. Os traços foram ensaiados por resistência à compressão, tração por compressão diametral, resistência de aderência e porosidade. No procedimento de auto-cura os AGR foram imersos em água durante 30 dias antes da concretagem, contribuindo para reação de partículas não hidratadas de cimento. As três técnicas aprimoraram a resistência à tração e de aderência e diminuíram a porosidade dos concretos, comparando-se a um traço de referência, produzido pelo NMA. Com o emprego da auto-cura, do TSMA e da adição de 10% de sílica ativa foram obtidos ganhos na resistência à compressão (28 dias) de 11,63%, 20,47% e 37,2%, respectivamente [18].

Corinaldesi *et al*., (2009) [32] abordaram o uso de pozolanas combinadas ao TSMA, produzindo traços de concreto com 100% de agregados reciclados, graúdos e miúdos. Foram utilizadas adições de 15% de sílica ativa, sem substituição do cimento e de 30% de cinzas volantes (em peso do cimento), substituindo parcialmente os agregados miúdos. Os traços foram ensaiados, na primeira parte do estudo, por resistência à compressão e módulo de elasticidade. Na segunda parte, foram avaliados estrutura de poros, resistência à compressão e à tração, módulo de elasticidade, resistência de aderência, retração por secagem, carbonatação e resistência à penetração de íons cloreto de traços contendo adição de apenas cinzas volantes, em 38% do peso do cimento. O uso

de cinzas volantes em substituição ao agregado miúdo ocasionou ganhos de aproximadamente 50% na resistência à compressão aos 28 dias, comparando-se ao concreto com 100% de AGR e sem adições minerais, contribuindo para aprimorar também a aderência concreto-aço e resistência à penetração de íons cloreto e reduzindo tamanho e quantidade de poros [32].

Rajhans *et al*., (2018) [35] elaboraram uma variação do TSMA, denominada TSMAsfc (*sílica fume, fly ash, cement*), encapsulando os AGR na primeira etapa da mistura, como no SEPP, com sílica ativa e uma porcentagem do cimento. Na segunda etapa são adicionados o restante do cimento, cinzas volantes, água, areia e aditivo superplastificante. Foram produzidos concretos auto adensáveis com 20, 40, 60 e 100% de AGR, adições de sílica ativa em 2, 4, 6, 7 e 8%, e adição de 34,78% de cinzas volantes. Os traços foram avaliados segundo densidade, trabalhabilidade, resistência à compressão, à flexão, à tração e módulo de elasticidade, tendo sua microestrutura avaliada por microanálise de sonda de elétrons. Foi alcançada uma melhora de até 17,61% na resistência à compressão (28 dias) dos concretos produzidos pelo TSMAsfc, comparados aos produzidos pelo NMA. Os outros aspectos mecânicos avaliados e a microestrutura apresentaram melhora com o uso do método proposto e as adições. Os traços produzidos pelo TSMAsfc com 100% de AGR atingiram até 90,77% da resistência à compressão de traços produzidos com 100% de agregados naturais [35].

Baseando-se em pesquisas anteriores, Kong *et al*., (2010) [19] elaboraram um método de mistura em três etapas para concretos de agregados reciclados, denominado *Triple Mixing Method* (TM), consistindo em misturar inicialmente os agregados miúdos e graúdos a uma parte da água do traço, adicionando em seguida as adições pozolânicas, encapsulando-os, combinando o SEPP e o *Double Mixing Method* (DM). A mistura é finalizada com adição do cimento, aditivo superplastificante e água. Foram produzidos traços por três métodos de mistura (NMA, DM, TM), com 100% de AGR, adições de cinzas volantes e escória de alto-forno. Os concretos foram ensaiados segundo resistência à compressão e resistência à penetração de íons cloreto, tendo sua microestrutura avaliada por MEV. O emprego do TM com uso de adições aprimorou a resistência à compressão em até 30,75% e 25,73%, comparando-se a traços produzidos pelo NMA e DM, respectivamente. O método proposto afetou de maneira positiva a resistência à penetração de íons cloreto e a microestrutura. O TM facilitou a reação das adições pozolânicas com os cristais de $Ca(OH)_2$ presentes nos poros dos agregados reciclados, formando produtos de hidratação e fortalecendo a ZTI do concreto. Os concretos com 100% de AGR produzidos pelo método obtiveram resistência à compressão de até 99,5% da resistência à compressão de concretos com 100% de agregados naturais, produzidos pelo método de mistura convencional (NMA) [19].

Zhang *et al*., (2019) [36] buscaram otimizar o TM, promovendo uma maior densificação das ZTI, em um método chamado *Optimized Triple Mixing Method* (OTM). Os diferenciais do OTM em relação a métodos anteriores são: adição de materiais pozolânicos diretamente aos agregados graúdos, antes dos outros componentes do concreto; processo de adição e cálculo da quantidade de água no traço, adicionando 80% da água de mistura em uma primeira etapa e levando em conta a capacidade de absorção de água de todos os agregados e adições envolvidos; adição do superplastificante ao concreto juntamente com os materiais pozolânicos, promovendo sua dispersão e facilitando a formação de uma camada de encapsulamento dos AGR com baixo fator água/cimento. Foram ensaiados concretos com 100% de AGR e 30% de agregados miúdos reciclados, adições de 10% de sílica ativa e 10% e 20% de cinzas volantes, avaliando resistência à compressão, gelo e degelo e a impermeabilidade dos concretos produzidos. O emprego do OTM aprimorou em 8,4% e 19% a resistência à compressão dos concretos, comparados aos produzidos pelo DM e TM, respectivamente, além de aumentar sua impermeabilidade e a resistência a ciclos de gelo-degelo. O método aumentou a concentração de pozolanas nas ZTI, otimizando sua estrutura de poros, diminuindo porosidade e o tamanho dos poros no local, contribuindo positivamente para as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto [36].

Brand *et al*., (2015) [34] avaliaram os efeitos dos métodos de mistura NMA e TSMA, combinados a três diferentes condições de umidade dos AGR: secos ao forno (OD), saturados superfície úmida (SSD) e parcialmente saturados superfície úmida (80% SSD). Os traços foram produzidos com 100% de AGR, adição de 20% de cinzas volantes e avaliados por trabalhabilidade, retração, resistência à compressão, tração e flexão. A condição OD foi obtida por colocação dos AGR em um forno, a 105°C, 24 horas antes da concretagem. Os agregados com superfície saturada úmida (SSD) foram imersos em água por 24 horas, antes da concretagem, removendo em seguida a umidade restante, até atingirem a condição estipulada. A condição de 80% SSD foi obtida por meio de pulverização com água dos agregados graúdos, 24 horas antes da concretagem, colocando-os em ambiente de temperatura controlada, para evaporação do excesso de água. A combinação do TSMA e AGR na condição de umidade 80% SSD produziu, dentro do estudo, os concretos de agregados reciclados com os maiores valores de resistência à compressão [34].

Li *et al*., (2012) [33] buscaram maior entendimento de como as características mecânicas e a microestrutura das ZTI são influenciadas por alterações nos métodos de mistura. Foram utilizados MEV e nanoindentação para caracterização, em escala nanométrica, da microestrutura e propriedades mecânicas das ZTI do concreto de agregados reciclados, estimando, indiretamente,

sua porosidade e a concentração de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), cristais de $Ca(OH)_2$ e partículas não hidratadas de cimento. Foram produzidos traços pelo NMA e TSMA. O TSMA possibilitou o encapsulamento dos AGR, aumentando a densidade das ZTI, preenchendo vazios e fissuras da antiga pasta de cimento aderida ao agregado reciclado, reduzindo efetivamente o tamanho dos cristais de $Ca(OH)_2$ formados ao redor dos AGR e contribuindo para maior produção de C-S-H, fortalecendo as ZTI e produzindo um concreto com melhor performance mecânica [33].

2.6. Análise segundo lentes de pesquisa

A Tabela 5 resume os métodos de mistura utilizados por cada pesquisa abordada, os percentuais de agregados reciclados utilizados, as adições e os respectivos teores utilizados. Do total de artigos do portfólio, oito ensaiaram traços com 100% de AGR, indicando uma tendência das pesquisas em viabilizar o emprego do máximo possível de AGR, procurando minimizar o impacto ambiental do concreto e oferecendo uma alternativa mais sustentável comparada ao uso de agregados virgens.

Tabela 5 - Métodos de mistura, adições e níveis de AGR utilizados nos estudos do portfólio

Autor	Métodos de mistura ensaiados	Percentuais de AGR utilizados na pesquisa	Adição utilizada	Teor de adição
OTSUKI, *et al.*	NMA, DM	100%	-	-
TAM *et al.*	NMA, TSMA	10%, 15%, 20%, 25%, 30%	-	-
TAM *et al.*	NMA, TSMAp1, TSMAp2	10%, 15%, 20%, 25%, 30%	-	-
TAM *et al.*	NMA, TSMAs, TSMAsc	5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%	SA	2%
LI *et al.*	NMA, SEPP	100%	SA, CV, EA	10%, 20%
CORINALDESI *et al.*	TSMA	100%	CV AS	30% 15%
KONG *et al.*	NMA, DM, TM	100%	EA, CV	20%
LI *et al.*	NMA, TSMA	100%	-	-
ELHAKAM *et al.*	NMA + cura úmida	25%, 75%	SA	10%
BRAND *et al.*	TSMA+OD, TSMA+PSSD, TSMA+SSD	100%	CV	20%
RAJHANS *et al.*	NMA, TSMA, TSMAsfc	20%, 40%, 60%, 100%	SA CV	2%, 4%, 6%, 7%, 8% 34,78%
ZHANG *et al.*	DM, TM, OTM	100,00%	EA	20%

SA – Sílica ativa; EA – Escória de alto forno; CV – Cinzas volantes

Dos 12 estudos abordados, 11 propuseram novos métodos de mistura, modificando aqueles anteriormente expostos na literatura. Os métodos modificados, de maneira geral, contribuíram para aprimorar a trabalhabilidade, resistência mecânica e microestrutura dos concretos de agregados reciclados. A Tabela 6 indica os maiores índices de melhora de resistência à compressão de concretos de agregados reciclados por método de mistura adotado e concentração de AGR:

Tabela 6 - Métodos de mistura de concretos de agregados reciclados e maiores ganhos de resistência

Método de mistura de concreto	% AGR para maiores ganhos	Maiores ganhos de resistência à compressão pelo método abordado, comparando-se a método de mistura convencional	Adições utilizadas para maiores ganhos
DM	100,00%	12,90%	-
TSMA - Tam *et al.*, (2005)	20,00%	21,19%	-
TSMAp1	25,00%	11,47%	-
TSMAp2	20,00%	19,75%	-
TSMAs	25,00%	19,50%	2% SA
TSMAsc	25,00%	19,73%	2% SA
SEPP	**100,00%**	**45,40%**	**10% SA + 10% CV**
TM	**100,00%**	**30,75%**	**20% EA**
TSMA - Li *et al.*, (2012)	100,00%	7,14%	-
Convencional + cura úmida	75,00%	11,63%	-
TSMA - Elhakam *et al.*, (2012)	75,00%	20,47%	-
Encapsular+ 10% SA	**75,00%**	**37,21%**	**10% SA**
TSMA + OD	100,00%	8,28%	20% CV
TSMA + PSSD	100,00%	6,40%	20% CV
TSMA + SSD	100,00%	2,10%	20% CV
TSMAsfc	100,00%	17,61%	7% SA + 34,78% CV
OTM	100,00%	19,00%	20% EA

SA – Sílica ativa; EA – Escória de alto forno; CV – Cinzas volantes

Verifica-se uma tendência dos estudos, a partir da pesquisa de Tam *et al.*, (2008) [23], de utilizar adições pozolânicas combinadas às variações em métodos de mistura. Os métodos de mistura modificados que contam com o uso de adições pozolânicas utilizadas de modo a encapsular os AGR apresentaram os maiores ganhos de resistência à compressão, como destacado na Tabela 6.

A resistência mecânica do concreto é avaliada em todos os artigos, o que pode justificar seu uso como critério de comparação dos resultados dos diferentes métodos de mistura e adições utilizados realizado na Tabela 6. A segunda propriedade mais avaliada é a microestrutura do concreto, podendo indicar a tendência das pesquisas a explorar como a ZTI no concreto de agregados reciclados é modificada por métodos de mistura e uso adições e qual o impacto de tais modificações nas propriedades do concreto. Dos 12 artigos que compõem portfólio, 8 utilizaram adições pozolânicas. As cinzas volantes e sílica ativa foram empregadas em 5 estudos diferentes e a escória de alto forno foi utilizada em três estudos. Conforme exposto na Tabela 6, os maiores ganhos mecânicos foram obtidos para índices de adições de sílica ativa, utilizada de modo a encapsular os AGR. As pesquisas do portfólio, de maneira geral, utilizam adições em níveis de 10 a 20%, quando em substituição ao cimento.

3. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O presente estudo apresentou um processo de pesquisa acadêmica conduzido por meio do método de revisão sistêmica ProKnow-C. O método tornou possível a obtenção de um portfólio de artigos abrangente, variado e relevante sobre o estado da arte relacionado a métodos de mistura e adições pozolânicas em concretos de agregados graúdos reciclados.

A norma brasileira, NBR 15116 [37] que trata do uso de resíduos sólidos da construção civil em aplicações do setor, permite a utilização de agregados reciclados apenas em camadas de pavimentação e em concretos sem função estrutural. Segundo a norma, a viabilização da tecnologia para uso dos agregados reciclados na confecção de concretos estruturais depende de maiores estudos [37]. Em países como Austrália, Alemanha, China, Japão, Espanha e Coréia do Sul, o uso dos AGR em concretos com função estrutural é permitido e regularizado por normas específicas [7].

As pesquisas abordadas buscaram propiciar aos concretos de agregados reciclados atingir níveis de trabalhabilidade e resistência mecânica próximos aos do concreto de agregados naturais. Para alcançar tais resultados foram utilizadas diferentes adições pozolânicas e variados métodos de mistura. Não há, até o presente momento, adoção de um método de mistura padronizado para concretos de agregados reciclados. O tema é explorado na comunidade acadêmica e a análise do portfólio indica significativas melhoras às propriedades mecânicas e à durabilidade de concretos de agregados reciclados, em decorrência do emprego de métodos modificados e do uso de adições pozolânicas. O uso de tais métodos e materiais pode proporcionar aos concretos com 100% de AGR atingir até 99,5% da resistência à compressão concretos com 100% de AGN [19]. Os resultados positivos decorrentes do uso das técnicas analisadas podem contribuir para viabilizar o uso dos AGR em concretos estruturais, mudando a normatização brasileira.

A utilização de materiais pozolânicos como adição ao concreto de agregados reciclados proporciona melhores resultados quando os agregados são encapsulados pelas adições. As adições, quando utilizadas em substituição parcial do cimento, reduzem seu consumo em traços de concreto e reduzem, consequentemente, a quantidade de CO_2 associada ao concreto produzido. A adição de sílica ativa proporcionou os maiores aprimoramentos à resistência à compressão e durabilidade do concreto, fato que pode ter se dado devido à alta área superficial do material. Não foi verificado o uso de cinzas de casca de arroz ou cinzas de bagaço de cana, combinados a métodos de mistura modificados de concretos de agregados reciclados. O estudo do emprego de tais materiais associado a métodos de mistura modificados é uma possibilidade para pesquisas futuras.

4. REFERÊNCIAS

1. IPCC. **Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel**.

2. OYEDELE, L. O.; AJAYI, S. O.; KADIRI, K. O. **Use of recycled products in UK construction industry: An empirical investigation into critical impediments and strategies for improvement.** Resources, Conservation and Recycling, v. 93, p. 23–31, 2014.

3. WBCSD; IEA. **Cement Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050.** p. 36, 2009.

4. MEHTA, P. K. **Global Concrete Industry Sustainability.** Concrete international, n. February, p. 45–48, 2009.

5. MARZOUK, M.; AZAB, S. **Resources , Conservation and Recycling Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics. "**Resources, Conservation & Recycling," v. 82, p. 41–49, 2014.

6. MCNEIL, K.; KANG, T. H. K. **Recycled Concrete Aggregates: A Review.** International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 7, n. 1, p. 61–69, 2013.

7. TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. **A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017).** Construction and Building Materials, v. 172, p. 272–292, 2018.

8. BUTLER, L.; WEST, J. S.; TIGHE, S. L. **The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement.** Cement and Concrete Research, v. 41, n. 10, p. 1037–1049, 2011.

9. TOPÇU, ILKER B.; GÜNÇAN, N. F. **Using waste concrete as aggregate.** Cement and Concrete Research, v. 25, n. 7, p. 1385–1390, 1995.

10. AJDUKIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ, A. **Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC.** Cement and Concrete Composites, v. 24, n. 2, p. 269–279, 2002.

11. TOPÇU, İ. B.; ŞENGEL, S. **Properties of concretes produced with waste concrete aggregate.** Cement and Concrete Research, v. 34, n. 8, p. 1307–1312, Aug. 2004.

12. RAO A. **Experimental investigation on use of recycled aggregates in mortar and concrete.**, 2005.

13. LIANG, C. et al. **The damping property of recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials, v. 102, p. 834–842, 2016.

14. QI, B. et al. **Chloride penetration into recycled aggregate concrete subjected to wetting–drying cycles and flexural loading.** Construction and Building Materials, v. 174, p. 130–137, 2018.

15. SHI, C. et al. **Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review.** Journal of Cleaner Production, v. 112, p. 466–472, 2016.

16. AL-BAYATI, H. K. A. et al. **Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate.** Construction and Building Materials, v. 112, p. 284–298, 2016.

17. BEHERA, M. et al. **Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review.** Construction and

Building Materials, v. 68, p. 501–516, 2014.

18. ABD ELHAKAM, A.; MOHAMED, A. E.; AWAD, E. **Influence of self-healing, mixing method and adding silica fume on mechanical properties of recycled aggregates concrete.** Construction and Building Materials, v. 35, p. 421–427, 2012.

19. KONG, D. et al. **Effect and mechanism of surface-coating pozzalanics materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials, v. 24, n. 5, p. 701–708, 2010.

20. LI, J.; XIAO, H.; ZHOU, Y. **Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials, v. 23, n. 3, p. 1287–1291, 2009.

21. 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, 2005.

22. TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. **Environmental enhancement through use of recycled aggregate concrete in a two-stage mixing approach.** HUMAN AND ECOLOGICAL RISK ASSESSMENT, v. 12, n. 2, p. 277–288, 2006.

23. TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. **Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMAs and TSMAsc.** Construction and Building Materials, v. 22, n. 10, p. 2068–2077, 2008.

24. ZHANG, W. et al. **Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete.** v. 203, p. 601–607, 2019.

25. KAUARK, F. DA S.; MANHÃES, F. C.; MEDEIROS, C. H. **Metodologia da Pesquisa - um guia prático**. Itabuna: Via Litterarum, 2010.

26. FONSECA, J. J. S. DA. **Metodologia da pesquisa científica.** São Carlos: Serviço de Biblioteca e Informação ..., p. 1–127, 2002.

27. PROVDANOV, C. C.; FREITAS, E. C. DE. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2ª ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

28. VILELA, L. O. **Aplicação Do Proknow-C Para Seleção De Um Portifólio Bibliográfico E Análise Bibliométrica Sobre Avaliação De Desempenho Da Gestão Do Conhecimento.** Revista Gestão Industrial, v. 8, n. 1, p. 76–92, 2012.

29. CAPES. **Plataforma Sucupira. Periódicos Qualis. Classificação Periódicos Quadriênio 2013-2016**. Disponível em: <https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/veiculoPublicacaoQualis/listaConsultaGeralPeriodicos.jsf>. Acesso em: 23 may. 2019.

30. OTSUKI, N.; MIYAZATO, S.-I.; YODSUDJAI, W. **Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 15, n. 5, p. 443–451, 2003.

31. TAM, V. W.-Y.; GAO, X.-F.; TAM, C. M. **Comparing performance of modified two-stage mixing approach for producing recycled aggregate concrete.** Magazine of Concrete Research, v. 58, n. 7, p. 477–484, 2006.

32. CORINALDESI, V.; MORICONI, G. **Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials, v. 23, n. 8, p. 2869–2876,

2009.

33. LI, W. et al. **Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches.** Construction and Building Materials, v. 35, p. 1045–1055, 2012.

34. BRAND, A. S.; ROESLER, J. R.; SALAS, A. **Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete.** Construction and Building Materials, v. 79, p. 83–89, 2015.

35. RAJHANS, P.; PANDA, S. K.; NAYAK, S. **Sustainable self compacting concrete from CD waste by improving the microstructures of concrete ITZ.** Construction and Building Materials, v. 163, p. 557–570, 2018.

36. ZHANG, W. et al. **Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials, v. 203, p. 601–607, 2019.

37. ABNT. **NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural** -. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.