

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ENILSON RIBEIRO DA SILVA JÚNIOR

**SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UM ESTUDO ACERCA DA
PRODUÇÃO DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS E RESÍDUO
DE TIJOLO MOÍDO**

**JOÃO PESSOA
2022**

ENILSON RIBEIRO DA SILVA JÚNIOR

**SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UM ESTUDO ACERCA DA
PRODUÇÃO DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS E RESÍDUO
DE TIJOLO MOÍDO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Coordenação do
Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal da Paraíba
como requisito complementar para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil, sob orientação do
professor Dr. Givanildo Alves de
Azeredo.

**JOÃO PESSOA
2022**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586s Silva Junior, Enilson Ribeiro da.

Sustentabilidade na Construção Civil: um estudo
acerca da produção de concretos com agregados
reciclados e resíduo de tijolo moído / Enilson Ribeiro
da Silva Junior. - João Pessoa, 2022.
60 f. : il.

Orientação: Givanildo Alves de Azeredo.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Reciclagem. 2. Concreto sustentável. 3. Agregado
reciclado de concreto. 4. Resíduo de tijolo moído. I.
Azeredo, Givanildo Alves de. II. Título.

UFPB/CT

CDU 624(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

ENILSON RIBEIRO DA SILVA JÚNIOR

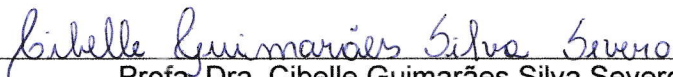
SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UM ESTUDO ACERCA DA PRODUÇÃO DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS E RESÍDUO DE TIJOLO MOÍDO

Trabalho de Conclusão de Curso em 01/12/2022 perante a seguinte Comissão Julgadora:



Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Profa. Dra. Cibelle Guimarães Silva Severo
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Aprovado



Prof. Dr. Enildo Tales Ferreira
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Profa. Andrea Brasiliano Silva
Matrícula Siape: 1549557
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

Dedico aos amigos, familiares e àqueles que enxergam nas contradições inerentes ao desenvolvimento, a oportunidade de tornar o mundo um lugar melhor de se viver.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que depositou no meu esforço tanta confiança e aguardou ansiosa por essa realização. À Maria das Dores e Enilson “pai”, que sempre foram para mim exemplos de perseverança e me motivaram até aqui. À Juliana Pereira que me ouviu nas horas mais difíceis e sempre esteve ao meu lado, ainda que com quilômetros de distância nos separando.

Aos meus amigos, que podem não fazer ideia de como foram importantes nesse ciclo que aqui encerro, em especial à Aline Dantas, Lucas Figueiredo, Maria Sandy, Iana Sales, Matheus Nóbrega, Micaely dos Santos e Anderson Nóbrega. Essas pessoas me acompanharam nesse trajeto e me surpreenderam, desde o começo, com sua empatia, gentileza e companheirismo.

Aos amigos engenheiros André Cavalcante e Jaylle Vitória, que no dia a dia de obra me apoiaram para que esse trabalho pudesse se concretizar.

Agradeço ao meu orientador Givanildo Alves de Azeredo pelo importante papel que desempenhou nos meus dias de acadêmico, despertando meu interesse pelo estudo dos materiais de construção, além de ter sido sempre solícito e compreensivo.

Finalmente, à Universidade Federal da Paraíba e todo seu corpo docente, de técnicos e demais profissionais que contribuíram para o meu desenvolvimento.

RESUMO

O setor da construção civil é um dos que mais consome recursos naturais escassos, além de ser um grande gerador de resíduos da construção e demolição (RCD). Nesse sentido, é preciso estudar meios de reinserir esses resíduos na cadeia produtiva de modo a promover práticas *sustentáveis* mais efetivas. Este estudo se concentra na avaliação do desempenho de concretos produzidos com substituição parcial do agregado graúdo natural (AGN) pelo agregado reciclado de concreto (ARC) em conjunto com a substituição parcial do cimento pelo resíduo de tijolo moído (RTM). Para tanto, seguiu-se com a caracterização e dosagem dos materiais. Foram produzidas séries variando-se de 0% a 30% o teor de substituição do cimento pelo RTM, e séries com 30% de substituição do AGN pelo ARC, com incorporação do RTM em substituição ao cimento variado de 0% a 30%. As amostras de concreto produzidas foram ensaiadas para identificação do abatimento, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água por imersão e por capilaridade. Concordando com a literatura, os resultados da análise de resistência mecânica e de durabilidade apontaram para o efeito de micropreenchimento dos vazios da matriz cimentícia quando o RTM é utilizado para baixos teores de substituição. O uso do ARC aumentou consideravelmente a porosidade do concreto e repercutiu nas demais propriedades. A variação dos índices de vazios e absorção foram mais expressivas nessas substituições. Quanto aos ensaios realizados para avaliação da resistência mecânica, não foram identificadas perdas significativas para todas as séries produzidas.

Palavras-chave: reciclagem; concreto sustentável; agregado reciclado de concreto; resíduo de tijolo moído.

ABSTRACT

The civil construction sector is one of the largest consumers of scarce natural resources, besides being a large generator of construction and demolition waste (CDW). Thus, it is necessary to study ways to reintegrate this waste into the production chain in order to promote more effective sustainable practices. This study focuses on the evaluation of the performance of concrete produced with partial replacement of coarse natural aggregate (CNA) by recycled concrete aggregate (RCA) and partial replacement of cement by waste brick powder (WBP). For this, it was followed by the characterization and dosage of the materials. Series were produced varying from 0% to 30% the replacement content of cement by WBP, and series with 30% replacement of CNA by RCA, with incorporation of WBP in replacement of cement varied from 0% to 30%. The concrete samples produced were tested to identify the slump, compressive strength, tensile strength by diametrical compression, water absorption by immersion and capillarity. In agreement with the literature, the results of the analysis of mechanical resistance and durability pointed to the effect of microfilling the voids of the cementitious matrix when WBP is used at low replacement levels. The use of RCA increased considerably the porosity of the concrete and reflected in the other properties. The variation void ratio and absorption were more expressive in these substitutions. As for the tests performed to evaluate the mechanical strength, no significant losses were identified for all series produced.

keywords: recycling; sustainable concrete; recycled concrete aggregate; waste brick powder.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Peneiramento dos agregados naturais	37
Figura 2 – Curva granulométrica da areia.....	37
Figura 3 – Curva granulométrica da brita e do ARC	38
Figura 4 – Curva granulométrica do cimento e do RTM.....	38
Figura 5 – Etapas para obtenção do RTM	39
Figura 6 – Etapas para obtenção do ARC	39
Figura 8 – Ensaio de resistência à compressão axial	43
Figura 9 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	44
Figura 10 – Difração de raios-X do ARC e do RTM	45
Figura 11 – Ensaio de abatimento (<i>slump</i>)	46
Figura 12 – Resistência à compressão axial.....	47
Figura 13 – Resistência à tração por compressão diametral	50
Figura 14 – Absorção por capilaridade	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações técnicas e normativas sobre agregados reciclados.....	20
Tabela 2 - Massa específica e módulo de finura da areia.....	35
Tabela 3 - Propriedades físicas do agregado graúdo natural e reciclado	36
Tabela 4 - Massa unitária dos agregados naturais	40
Tabela 5 - Proporções das misturas de concreto (kg/m ³)	42
Tabela 6 - Ensaio para o concreto no estado endurecido	42
Tabela 7 - Teor de materiais pulverulentos (%)	49
Tabela 8 - Propriedades físicas dos concretos produzidos.....	51

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A/C – Água/Cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

AGN – Agregado Graúdo Natural

AN – Agregado Natural

AR – Agregado Reciclado

ARC – Agregado Reciclado de Concreto

ARI – Alta Resistência Inicial

ARM – Agregado Reciclado Misto

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPV – Cimento Portland V

DRX – Difração de Raio-X

EPA - *Environmental Protection Agency*

RCD – Resíduos da Construção e Demolição

RTM – Resíduo de Tijolo Moído

ZTI – Zona de transição interfacial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 OBJETIVO GERAL	14
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL	15
2.2 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	16
2.3 USO DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO	22
2.3.1 PROPRIEDADES DO CONCRETO	23
2.3.1.1 ESTADO FRESCO	23
2.3.1.2 ESTADO ENDURECIDO	23
2.3.2 DURABILIDADE	25
2.4 USO DO RESÍDUO DE TIJOLO MOÍDO	27
2.4.1 MICROESTRUTURA DO PÓ E DO CONCRETO	28
2.4.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO	30
2.4.2.1 ESTADO FRESCO	30
2.4.2.2 ESTADO ENDURECIDO	31
2.4.3 DURABILIDADE	33
3 METODOLOGIA	34
3.1 MATERIAIS	35
3.2 AMOSTRAS DE CONCRETO	40
3.3 AVALIAÇÃO MECÂNICA	43
3.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	43
3.3.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	43
3.4 AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE	44
3.4.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	44
3.4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	45
4.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO	46
4.2.1 ESTADO FRESCO	46
4.2.1.1 ABATIMENTO DO CONCRETO	46
4.2.2 ESTADO ENDURECIDO	47

4.2.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	47
4.2.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	49
4.3 DURABILIDADE.....	51
4.3.1 ABSORÇÃO POR IMERSÃO.....	51
4.3.2 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE.....	52
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade resultou em crescentes investimentos em construção civil e infraestrutura, visto que novas necessidades foram sendo incorporadas aos centros urbanos, a exemplo das construções para moradia, saneamento e saúde (VILLAGRÁN-ZACCARDI *et al.*, 2022). No entanto, as práticas que levam ao desenvolvimento urbano, até hoje adotadas, são altamente dependentes da exploração de recursos naturais escassos.

A indústria da construção civil é um dos setores da economia que mais explora esses recursos escassos e, também, um dos que mais crescem. Além disso, o produto entregue por essa indústria resulta em uma grande quantidade de resíduos de construção e/ou demolição (RCD). Estima-se que, no Brasil, a produção desses resíduos representa mais de 50% do total dos Resíduos Sólidos Urbanos (CONTRERAS *et al.*, 2016).

Em grande parte dos municípios brasileiros, o RCD é disposto nos aterros de inertes, os quais possuem vida útil curta tanto em função da grande quantidade de resíduos que é gerada, como do pequeno porte dessas áreas (HAWLITSCHKE, 2014). Dessa forma, é demandado um custo das gestões locais para planejamento e execução de infraestruturas que poderiam ser destinadas a outros fins.

Emergem, portanto, as iniciativas das autoridades voltadas para as práticas sustentáveis de progresso. No Brasil, a Resolução CONAMA nº 307 e a lei nº 12.305, a qual institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos, são exemplos dessas iniciativas, visto que trazem em seu escopo uma série de diretrizes e critérios com o objetivo de estabelecer a gestão do RCD e implantar a prática da logística reversa.

A partir dessas iniciativas, novas responsabilidades foram atribuídas aos geradores de RCD e, nesse contexto, a reciclagem tem se mostrado uma maneira eficaz de retorno desses resíduos à cadeia produtiva, na forma de insumos. Tendo em vista que esse novo uso contribui para a preservação das jazidas de agregados, além de mitigar a demanda de aterros (WANG *et al.*, 2021). Considera-se, portanto, que o gerenciamento do RCD é, para a Economia Circular, uma importante estratégia no que tange à preservação dos recursos naturais e prevenção de impacto ambientais (GHISELLINI *et al.*, 2016).

Ao longo do tempo, o uso de RCD na composição de novos materiais foi alvo de estudo de diversas publicações, variando-se a composição dos resíduos, os

materiais em que seriam aplicados e as taxas de substituições, por exemplo. No entanto, para cada uma dessas situações pode ser identificada uma gama de variáveis, inerentes aos RCDs, capazes de influenciar diretamente o desempenho dos novos materiais, a exemplo da absorção, da granulometria, do tipo de resíduo, do local onde foi coletado, dentre outros. Diante dessa quantidade de variáveis, esse trabalho tem foco na análise da produção de concretos a partir do uso de agregado reciclado de concreto (ARC) como substituição parcial do agregado gráudo natural (AGN), e do resíduo de tijolo moído (RTM) em substituição parcial ao cimento.

Assim, esse estudo justifica-se, inicialmente, a partir da necessidade de se buscar um consenso, na literatura, a respeito dos efeitos provenientes da incorporação desses dois resíduos na composição do concreto. Tendo em vista que combinados a outros materiais, vários efeitos foram já constatados. Além disso, estudos que identifiquem exaustivamente as limitações ao uso do ARC e do RTM, poderão estimular o desenvolvimento de novas técnicas de melhoria do beneficiamento desses resíduos, de modo que, em breve, teores mais altos de substituições sejam viáveis.

A disseminação desses estudos corrobora para que o setor da construção civil, muito conservador, deposite maior confiança nessas técnicas sustentáveis. Isso implicará no melhoramento da gestão do RCD, sobretudo em um maior controle de qualidade da triagem desses resíduos. Dessa forma, os resíduos reciclados poderão obter melhor qualidade, garantindo a produção de concretos com características mais estáveis.

Vale salientar, ainda, que com o retorno progressivo desses resíduos à cadeia produtiva, será possível alcançar uma menor dependência das jazidas para a produção de agregados gráudos, e uma redução na emissão de poluentes em decorrência da menor produção de cimento. Além de que será possível constatar uma redução dos impactos ambientais causados pela deposição inadequada dos resíduos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral a avaliação do desempenho mecânico e das características relacionadas à durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto (ARC) e resíduo de tijolo moído (RTM) em substituição parcial ao agregado gráudo natural (AGN) e ao cimento, respectivamente.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar, na literatura, as principais considerações acerca do efeito do uso do ARC e do RTM no estado fresco e endurecido do concreto;
- Avaliar, experimentalmente, o desempenho mecânico e a durabilidade de amostras com substituições desses RCDs;
- Definir teores de substituição para o ARC e RTM que não comprometam significativamente o desempenho do concreto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

A indústria da construção civil tem um histórico conservador na sociedade. Sabe-se que os investimentos em pesquisa são cruciais para o desenvolvimento de qualquer indústria e, no entanto, os benefícios provenientes desses investimentos são comumente observados a longo prazo, ao passo que os custos com pesquisa e desenvolvimento surgem de imediato. Sendo assim, considerando a prioridade dada por esse importante setor a obtenção de resultados no menor prazo possível, tais investimentos terminam sendo negligenciados (WE FORUM, 2016).

No contexto da pandemia do coronavírus, estimativas apontam que no ano de 2020, foram investidos, no Brasil, R\$ 639,3 bilhões em construção civil. Esse número representou 8,6% do produto interno bruto (PIB) do país e 52,2% da formação bruta de capital fixo. Considerou-se nesse montante o valor das obras executadas por construtoras e por trabalhadores, de forma isolada, além dos serviços de reforma. Percebe-se que mesmo diante de uma crise mundial de saúde, o investimento total no setor da construção civil foi em torno de R\$ 3,0 mil por habitante (CONSTRUBUSINESS, 2021).

A indústria da construção civil é responsável ainda por grandes impactos ambientais, tendo em vista a quantidade de resíduos gerados em sua operação. Na ausência de um plano de gerenciamento desses resíduos, eles são descartados em locais inadequados para a sua deposição, a exemplo dos comumente chamados “bota-foras”. A incorreta destinação desses resíduos culmina no agravamento dos problemas de saneamento urbano, a partir do assoreamento de rios, obstrução dos sistemas de drenagem e consequente alagamento das vias urbanas, deterioração

precoce dos pavimentos, esgotamento das áreas destinadas à deposição de resíduos sólidos, dentre outros transtornos.

A necessidade de conciliar o desenvolvimento humano com as limitações do espaço e dos recursos naturais tem exigido das economias, cada vez mais, iniciativas embasadas no ideário do desenvolvimento sustentável. O aprimoramento das técnicas de produção pautadas na busca por melhorias de eficiência e manutenção dos recursos naturais e energéticos é um meio capaz de fornecer às gerações futuras uma melhor qualidade no padrão de vida (BAPTISTA JÚNIOR; ROMANEL, 2013).

Uma iniciativa tomada pelos governos na tentativa de estabelecer padrões mais sustentáveis na cadeia produtiva é a instituição de normas e diretrizes que orientam a logística dos insumos de modo que ao fim do processo produtivo, os resíduos gerados retornem para a cadeia.

2.2 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Resíduos de construção e demolição (RCD) são os gerados em construção, demolição, reparos e reformas de obras da construção civil, bem como os provenientes da preparação do ambiente para obras e de escavações (BANIAS, 2010; CLARK; JAMBECK; TOWNSEND, 2006; CHEN; LU, 2017; CONAMA, 2002; GANGULY, 2012; GINGA; ONGPENG; DALY, 2020).

Os RCDs podem ser genericamente classificados em resíduos reutilizáveis e não reutilizáveis, sendo estes últimos, os que possuem materiais contaminantes considerados perigosos, com uso restringido pela legislação. Os principais resíduos reutilizáveis são os de concreto, material cerâmico e argamassas, com aproveitamento principalmente na produção de agregados reciclados para a produção de novos concretos e argamassas (ROBAYO-SALAZAR; VALENCIA-SAAVEDRA; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, 2020).

A Resolução CONAMA nº 307 de 2002, estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, classificando-os com as letras A, B, C e D. Os resíduos classe “A” representam mais de 90% do total de RCD (AKHTAR, 2018). São eles os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregado, incluindo o concreto, argamassas, tijolos, solos provenientes de terraplanagem, dentre outros. Os resíduos classe “B” compreendem os recicláveis para outras destinações, como o plástico, papel, vidro, dentre outros. Consideram-se de classe “C” os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias que

permitam sua reciclagem e reuso, a exemplo do gesso. A classe “D” representa os resíduos perigosos provenientes do processo de construção, tais como tintas, solventes e óleos.

Ainda no ensejo de conciliar o desenvolvimento da indústria da construção com as boas práticas de sustentabilidade, a lei brasileira nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 estabeleceu, dentre outras providências, a prática da logística reversa, definida pela lei como um instrumento de desenvolvimento econômico e social dotado de um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada. Nesse contexto, uma série de responsabilidades passaram a ser atribuídas aos agentes geradores de resíduos tendo em vista a necessidade de se legitimar as práticas sustentáveis na cadeia produtiva.

O uso do RCD como insumo na construção civil foi registrado pela primeira vez após a Segunda Guerra Mundial durante a reconstrução da Europa (WEDLER; HUMMEL, 1946 *apud* LEVY, 1997). Diante da necessidade de dar uma destinação para a grande quantidade de resíduos provenientes da destruição das construções e, por outro lado, dado o aumento na demanda por materiais de construção, o emprego do RCD como agregado reciclado teve importante papel no meio urbano, a partir da redução dos custos com limpeza e disponibilização de materiais reciclados (HANSEN, 1992).

O gerenciamento do RCD no Brasil foi iniciado tardiamente, aproximadamente seis décadas depois dos países europeus (MELO, 2011). E foi no município de São Paulo, em 1991, que teve início as operações da primeira usina de reciclagem do RCD do Brasil e América Latina. A partir desse primeiro contato, outras usinas foram instaladas pelo país (NUNES, 2004).

Usualmente, a reciclagem da fração mineral do RCD é realizada a partir de algumas etapas, a mais comum é a britagem, que por meio da ação mecânica de compressão ou impacto, reduz as partículas a dimensões apropriadas para o uso. A segunda etapa consiste no peneiramento, a fim de se estabelecer a separação granulométrica do material. Por fim, tem-se a catação, etapa que pode ser realizada antes ou depois da britagem. Tem como objetivo separar a fração mineral dos possíveis contaminantes (CARRIJO, 2005; ANGULO *et al.*, 2009).

Em países como o Japão, Alemanha e Holanda as especificações técnicas referentes ao uso de agregado reciclado na construção civil são bem estabelecidas e representam um grande avanço técnico nessa questão. Outros países estão passando pelo processo de adequação a essa necessidade e, as aplicações desses materiais variam em função de diversos fatores, a exemplo das restrições normativas e disponibilidade de matéria-prima. No Brasil, a dificuldade de se estabelecer um mercado de reciclagem desses resíduos está atrelada a falta de conhecimento, por parte da indústria, acerca dos benefícios técnicos, econômico e ambiental do agregado reciclado (ALBERTE; HANDRO, 2021).

Uma grande quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD) são gerados anualmente em todo o mundo. Estima-se que cerca de 40% do total de resíduos gerados são provenientes da construção civil. A dificuldade em quantificar esses resíduos é um impasse para a viabilidade na gestão desses materiais. (Barbudo *et al.*, 2020; Ya'Cob *et al.*, 2013; Yuan; Shen, 2011)

Diferente do que ocorre em países como o Brasil, nos Estados Unidos há uma distinção entre resíduos sólidos urbanos (RSU) e resíduos da construção e demolição (RCD), compreendendo esses últimos os resíduos de aço, madeira, drywall e gesso, tijolo e telha de barro, telhas asfálticas, concreto e concreto asfáltico. Desses resíduos, pode-se identificar uma fração que é destinada aos aterros sanitários e uma outra, que é reciclada e/ou reutilizada de diversas formas, como o insumo na fabricação de novos produtos, em compostos para a correção de solo, dentre outras. Estima-se que em 2018 foram gerados 600 milhões de toneladas de RCD, dentre os quais, 67.5% era composto de resíduos de concreto, seguido dos resíduos de concreto asfáltico, com 17.8%. Para o mesmo ano, o serviço de demolição representou mais de 90% de todo o RCD produzido no ano, enquanto a construção representou menos de 10% desse total (EPA, 2020).

Em um estudo realizado por Jin e Chen (2015), o qual ocorreu, em parte, com a aplicação de um questionário referente a reciclagem do concreto na indústria estadunidense, mais de 85% dos participantes relataram que a demolição de estruturas antigas eram fontes potenciais para a reciclagem do concreto. Ainda na pesquisa, 90% dos participantes acreditavam que o concreto com potencial de reciclagem era, de fato, reciclado, e pouco mais de 75% dos entrevistados acreditavam que os resíduos eram empregados como aterro e base de rodovias.

Na China, por outro lado, a produção de RCD representa 30% a 40% de todo o resíduo gerado pelas cidades, com uma taxa de reciclagem e reuso de 5%. Essa alta geração de RCD e seu baixo índice de aproveitamento está atrelada à gestão ineficaz desses resíduos, aos custos para descarte, inadequação do planejamento urbano e um mercado ainda subdesenvolvido para o reuso do RCD (HUANG *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2021).

Na Índia, um trabalho realizado por Jain, Singhal e Jain (2019), tratou de quantificar a taxa de geração de RCD a partir de uma abordagem de análise do fluxo de material, constatando que as áreas urbanas geraram mais de 150 milhões de toneladas de RCD em 2016, e aproximadamente 50% desses resíduos foram gerados em pequenas e médias cidades.

A produção de RCD estimada para o Brasil é superior a 70 milhões de toneladas por ano, equivalente a 500 kg/ano *per capita*, e representa a maior proporção dos resíduos sólidos dos municípios. Nos últimos anos, com o apoio das políticas nacionais, que estabelecem uma série de diretrizes, critérios e responsabilidades referentes à gestão dos resíduos sólidos, alguns municípios vêm tomando medidas para implantação do sistema de reciclagem. No entanto, atualmente uma pequena fração do RCD é reciclada (CONTRERAS *et al.*, 2016).

De todo o RSU coletado em 2017 (cerca de 42,3 milhões de toneladas), 59.1% foi disposto em aterros sanitários. O restante correspondente a 40,9% dos resíduos sólidos coletados, foi depositado em locais inapropriados por 3.352 municípios brasileiros, o que totaliza mais de 29 milhões de toneladas de resíduos em lixões ou aterros controlados, locais que não possuem o controle e medidas necessárias para a preservação do meio ambiente, situação que resulta em diversos danos para a população. Além disso, ainda em 2017, foram coletados 45 milhões de toneladas de RCD, representando redução de 0.1% em relação ao ano anterior (ABRELPE, 2017).

Alberte e Handro (2021) realizaram um levantamento das especificações técnicas e normativas acerca de agregados reciclados já estabelecidas em diversos países (tabela 1). Dentre as principais destinações dadas a esses agregados, estão o seu aproveitamento em pavimentação de rodovias, produção de concretos, argamassas e em terraplanagem.

Dentre os principais critérios trazidos pelas normas para uso do RCD como agregado reciclado na fabricação de concreto, estão a absorção de água e massa específica seca. Essas características recebem maior relevância em virtude da

influência desses fatores sobre a resistência mecânica do concreto. Os valores mínimos para a massa específica variam conforme a origem do agregado reciclado, sendo de 2.200 kg/m³ para agregados reciclados de concretos (ARC) e variando de 1.500 a 2.000 kg/m³ para agregados reciclados mistos (ARM) e agregados reciclados cerâmicos (ARCE). Em países como Japão e China, ao especificar os agregados reciclados de alta qualidade, as normas tornam-se mais rígidas quanto a densidade, sendo de 2450 e 2500 kg/m³, respectivamente. A máxima absorção de água deve ser de 3% e 10% para ARC de alta e baixa qualidade, respectivamente. Variando-se entre 7% e 20% para ARM e ARCE. Além dessas características, são estabelecidos critérios quanto ao teor de cloreto e de sulfatos, tendo em vista a influência desses agentes na vida útil do concreto (BRITO; AGRELA; SILVA, 2019).

Recentemente, no Brasil, a NBR 15116:2021 foi atualizada e passou a prever o uso de agregados reciclados na confecção de concretos com função estrutural. Para tanto, o agregado reciclado deve ser composto na sua fração graúda de, no mínimo, 90% em massa de fragmentos à base de Cimento Portland e rochas. A substituição de agregados naturais pelos reciclados deve ser de até 20% e considerando classe de agressividade I e II. Por fim, a norma orienta o uso desses agregados em concretos com resistência máxima de 20 Mpa. A absorção de água desses agregados deve ser de até 7%. Já para as características relacionadas a durabilidade do concreto, a norma estabelece o limite de 0,1% para o teor de SO₄ e Cl. Apesar das restrições conservadoras da norma em alguns aspectos, como a resistência máxima do concreto produzido com ARC, nota-se um avanço técnico na busca por novas aplicações do RCD.

Tabela 1 - Especificações técnicas e normativas sobre agregados reciclados

País	Norma	Ano	Aplicação do AR				
			Pavi-mentos	Con-creto	Arga-massas	Terra-planagem	Outros
Brasil	NBR 15115 (ABNT, 2004a)	2004	X				
	NBR 15116 (ABNT, 2004b)	2004	X	X			
Alemanha	DIN 4226-100 (DEUTSCHES..., 2002)	2002		X	X		

	DAfStb (GONÇALVES; BRITO, 2010)	2010		X			
	TLGESTEIN- STB (ROAD..., 2004)	2004	X				
Áustria	OBRV; OGRB (AUSTRIAN..., 2004)	2004	X				X
Austrália	CSIRO HB 144 (COMMONWEA LTH..., 2002)	2002	X	X			
	DPTI (DEPARTMENT. ..., 2001)	2001	X			X	
Bélgica	PTV 406 (ORGANISME..., 2016)	2016	X		X	X	
	NBN B15-001 (BELGIUM..., 2006)	2006		X			
Espanha	EHE-08 (MINISTERIO..., 2008)	2008		X			
	IHOBE/País Basco (SOCIEDAD..., 2011)	2011	X	X	X	X	
	GEAR (GRÊMIO..., 2012)	2012	X	X		X	X
	AOPJA/Andaluzi a (AGENCIA..., 2015)	2015	X	X			
Estados Unidos	MDOT (MICHINGAN..., 2012)	2012	X	X			
	TxDOT (TEXAS..., 2014)	2014	X				
	FDOT (FLORIDA..., 2017)	2017		X			
Holanda	CUR (CUR AANBEVELING, 1984)	1984		X			
	NEN 5905 (ROYAL..., 2005)	2005		X			
	RAW (HENDRIKS; JASSEN; VÁZQUEZ..., 2005)	2005	X			X	

Hong Kong	WBTC Nº 12 (DEVELOPMENT BUREAU..., 2002)	2002	X	X			
Inglaterra	UKBS 8500-2 (BRITISH..., 2006)	2006		X			
	BRE DIGEST 433 (BUILDING..., 1998)	1998		X			
Japão	JIS A 5021 / JIS A 5022 / JIS A 5023 (JAPANESE..., 2005, 2007, 2006)	2005, 2007, 2006		X			
Suíça	OT 70085 (CONFÉDÉRATION..., 2006)	2006		X			
	SN 670 142/143/144 (SWISS..., 1998a, 1998c, 1998d)	1998	X			X	
França (Âmbito internacional)	TC 121-DRG (RILEM, 1994)	1994		X			

Fonte: ALBERTE; HANDRO (2021)

2.3 USO DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO

Mazhoud *et al.* (2022) estudaram as propriedades do ARC em uma faixa granulométrica de 10 mm a 14 mm e identificaram uma variação elevada na densidade e absorção de água dos agregados. A densidade foi 14% inferior quando comparada com a do agregado natural, ao passo em que o coeficiente de absorção de água foi 5 vezes maior, mesmo tendo sido considerada uma faixa granulométrica estreita. Esse efeito foi explicado pela dispersão do teor de argamassa aderida nos agregados. Nos seus estudos, a angularidade dos ARC apresentou maiores valores, o que pode ser explicado pela presença de argamassa aderida aos cantos dos agregados, tornando-os mais angulares.

Concordando com o estudo anterior, Abreu, Evangelista e Brito (2018) obtiveram elevações na absorção de água com variações entre 5,65% e 9,6%. Além disso, as densidades do concreto nos estados fresco e endurecido apresentaram valores inferiores aos das amostras de controle.

2.3.1 PROPRIEDADES DO CONCRETO

2.3.1.1 ESTADO FRESCO

Nos estudos de Poon, Kou e Lam (2007) foram realizados experimentos acerca das propriedades do concreto no estado fresco, fazendo uso de agregado graúdo reciclado em substituição ao agregado graúdo natural. As substituições variaram de 0 a 100% com AR de tamanhos máximos de 10 e 20 mm. O AR foi utilizado na condição seco ao ar, com teor de umidade inicial consideravelmente inferior à capacidade de absorção. Com uma razão a/c 0.55, quantidades de água foram adicionadas à mistura para compensar a absorção dos agregados reciclados. Observou-se que para a substituição de 100% com AR, o abatimento tronco de cone foi o maior. Tal resultado encontra explicação na maior quantidade de água livre inicialmente na mistura. O estudo realizado por Barra (1996), observou que a absorção desses agregados, na mistura do concreto, pode não corresponder a absorção de água livre aferida em laboratório, tendo em vista que os poros de ARC são preenchidos pela pasta de cimento e, em decorrência disso, um aumento da relação a/c efetiva poderá ser observado.

Ao realizar revisão da literatura acerca das propriedades do concreto no estado fresco, produzido com agregados reciclados, Silva, Brito e Dhir (2018) identificaram que apesar da compensação de água, que pode ser feita na mistura do concreto, maiores angularidades e rugosidades de determinados agregados reciclados podem resultar em menor trabalhabilidade da mistura, em função do maior atrito entre as partículas. Assim, para evitar o aumento da razão a/c efetiva, o uso de aditivo redutor de água se faz importante quando se objetiva manter o abatimento constante da mistura. Um outro consenso importante diz respeito ao efeito do aumento das substituições na densidade fresca do concreto, que leva a uma diminuição linear dessa última e perda de aproximadamente 5% para substituições de 100% de AR graúdo. A explicação para isso está no teor de argamassa aderida e presença de partículas cerâmicas na mistura.

2.3.1.2 ESTADO ENDURECIDO

Ferreira, Brito e Barra (2011) estudaram os efeitos do uso dos métodos de pré-saturação e compensação de água dos ARC nas principais propriedades do concreto. Substituições de 20%, 50% e 100% foram analisadas pelos autores tanto para o método de pré-saturação do agregado, como para o de compensação de água. Dentre as principais conclusões do estudo, observou-se que para os dois métodos a

densidade do concreto fresco era inferior à do concreto controle; nas idades de 7 e 28 dias as amostras com ARC apresentaram menor resistência à compressão, sendo a resistência à compressão inicial mais rápida nos concretos de ARC, ficando mais lenta entre 7 e 28 dias. O módulo de elasticidade foi menor para as substituições ARC preparado com pré-saturação. O enfraquecimento da Zona de Transição Interfacial (ZTI) pode explicar esse resultado.

Abreu, Evangelista e Brito (2018) trataram de avaliar os efeitos do ARC nas propriedades do concreto após vários ciclos de reciclagem. Para isso, prepararam concretos com ARC com até 3 ciclos de reciclagem. As substituições foram de 25% e 100%. Genericamente, todas as propriedades estudadas apresentaram perdas, tendo sido de 12,9%, 19,4% e 34% as perdas máximas registradas na resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade, respectivamente. Para essa última propriedade, a razão de 100% de substituição resultou em perdas mais expressivas. Comparativamente com o concreto controle, o primeiro ciclo resultou em decréscimo do módulo de elasticidade de 24,0%, do primeiro para o segundo ciclo esse valor foi de 11,3%, do segundo para o terceiro ciclo percebeu-se um aumento desprezível, considerando-se então a estabilização dessa propriedade após o segundo ciclo da reciclagem.

Para Alexandridou, Angelopoulos e Coutelieris (2018) os testes realizados com AR na composição do concreto indicaram que a resistência à compressão pode apresentar redução de até 37%. Medjigbodo *et al.* (2018) relataram que substituições de 30% e 100% resultaram em decréscimos de 9,2% e 12,1% na resistência à compressão aos 28 dias em relação ao concreto controle. Esse efeito negativo foi observado, também para o módulo de elasticidade dinâmico, com reduções de 13% e 23% para as substituições de 30% e 100%, respectivamente.

Eventualmente as substituições de AGN influenciaram positivamente as propriedades mecânicas do concreto, a exemplo do que foi observado para a resistência à compressão nos estudos de Thomas, Setién e Polanco (2016), os quais registraram aumentos da resistência, ainda que pouco expressivos, conforme se aumentava o grau de substituição (de 0% a 100%), utilizando ARC com coeficiente de absorção de água de 4,37% e porosidade inferior a 10%. Deve-se salientar que, diferente do que comumente é praticado em outros estudos, para o cálculo da razão a/c efetiva, considerou-se a absorção dos agregados. No entanto, a perda de água proveniente dessa absorção não foi compensada, e para mitigar o efeito adverso da

redução da razão a/c na trabalhabilidade do concreto, o uso de aditivo superplastificante foi adotado.

Dessa forma, a explicação encontrada para esse efeito benéfico quanto à resistência a compressão está no aumento da quantidade de cimento por unidade de volume em função da redução do a/c. Por outro lado, esse aumento do teor de cimento por unidade de volume torna a produção mais onerosa e, portanto, insustentável quando se leva em consideração as justificativas empregadas para a produção desses concretos (THOMAS; SETIÉN; POLANCO, 2016).

Conclusivamente, na revisão da literatura realizadas por Salgado e Silva (2022), os resultados de diversos estudos convergem para uma redução da resistência à compressão quando a taxa de substituição de AR aumenta. O mesmo é observado para o módulo de elasticidade, que encontra explicação na dupla zona de transição interfacial (ZTI) dos concretos produzidos com AR. Como a ZTI do AR é mais fraca, a resistência diminui e, conseqüentemente, maior deformabilidade é observada nos concretos. Além disso, grandes discrepâncias podem ser percebidas ao comparar os resultados experimentais com os obtidos em curvas teóricas que levam em consideração apenas a resistência à compressão do concreto, salientando-se que é importante se levar em consideração outros parâmetros dos materiais, a exemplo da densidade e absorção do AR.

2.3.2 DURABILIDADE

Algumas correlações podem ser feitas entre as propriedades mecânicas e a durabilidade dos concretos de ARC, como foi possível observar nos estudos de Brito *et al.* (2016), que fizeram substituições de 25% e 100% de ARC, e mais uma substituição de 100% de ARC fazendo uso de superplastificante, observando que para a profundidade de carbonatação, variações pouco significativas eram identificadas ao comparar as substituições com e sem o uso de aditivo superplastificante, ainda que uma leve tendência no aumento da profundidade tenha sido constatada. Uma justificativa encontrada pelos autores para esses resultados foi quanto a alta qualidade dos agregados reciclados e ao processo de cominuição com britagem terciária.

Nos estudos de Alexandridou, Angelopoulos e Coutelieris (2018), um aumento da profundidade de carbonatação foi observado para todas as taxas de substituição (de 0% a 75%), e todos os tempos de exposição. O resultado mais negativo foi para a substituição de 75% após 56 e 272 dias. Os autores concluíram que substituições

de 25% e 50% não apresentaram diferenças significativas quanto à profundidade de carbonatação.

Brito *et al.* (2016) avaliaram o ingresso de cloretos com a incorporação de ARC a partir do coeficiente de difusão de íons cloreto. A substituição em 100% apresentou resultado muito próximo ao do concreto controle, com uma redução de 3%, enquanto que a substituição de 25% resultou em um acréscimo pouco significativo no coeficiente de difusão. Por outro lado, substituições de 100% com superplastificante apresentaram coeficiente de difusão e profundidade de carbonatação significativamente inferiores. O que pode ser explicado pela maior compacidade do concreto e menor permeabilidade da matriz cimentícia. Dessa forma, foi possível identificar e concordar com outros estudos que relacionam diretamente a resistência à compressão com a difusão de íons cloretos e a profundidade de carbonatação, considerando que a resistência à compressão é uma medida indireta da compacidade do concreto.

Com enfoque na profundidade de carbonatação de concretos produzidos com ARC, Xiao, Lei e Zhang (2012) identificaram que esses agregados podem trazer malefícios e benefícios no que diz respeito a durabilidade do concreto sob esse aspecto. O primeiro caso pode ocorrer quando se é feito o uso de agregados muito porosos, os quais resultarão em misturas de concreto com porosidade elevada e, consequentemente, elevar a profundidade de carbonatação. No entanto, ARC com alto teor de cimento (presente na argamassa aderida) apresentam uma reserva alcalina que poderá ser carbonatada, favorecendo a resistência.

Por outro lado, a influência da pré-saturação dos ARC é analisada quanto ao seu efeito no que diz respeito à durabilidade do concreto nos estudos de Ferreira, Brito e Barra (2011), evidenciando-se maior retração de secagem e absorção de água por imersão e por capilaridade.

Vale destacar, ainda, o estudo realizado por Medjigbodo *et al.* (2018) acerca da retração autógena dos concretos produzidos com ARC. Os autores perceberam que para os concretos preparados com ARC, esse valor apresentou reduções próximas de 40% e 50% em relação ao concreto controle, tendo sido considerada desprezível para a substituição de 100%. Esse efeito dos agregados na retração é atribuído a sua permeabilidade e capacidade de absorção de água. Dessa forma, durante a hidratação do concreto essa água é fornecida para a matriz de cimento e, consequentemente, o efeito de retração é mitigado.

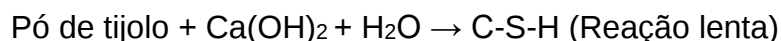
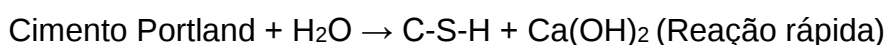
Por fim, ressalta-se que na tentativa de mitigar os efeitos negativos do AR nas substituições de AN, alguns autores se dedicaram ao estudo de tratamentos do AR para que fosse possível a produção de concretos com qualidade mais próxima das dos concretos produzidos com AN. Dentre os métodos mais comuns, estão a adição de micropós pozolânicos e emulsões poliméricas. Com uso de alguns desses métodos pôde-se chegar a resultados satisfatórios no que diz respeito a resistência mecânica e de longo prazo dos concretos (SALGADO; SILVA, 2022).

2.4 USO DO RESÍDUO DE TIJOLO MOÍDO

Na busca por uma taxa de incorporação cada vez maior de materiais residuais reciclados na composição de concretos, os pós provenientes de RCD vêm sendo amplamente utilizados como materiais pozolânicos, no meio acadêmico.

A ABNT NBR 12653:2014, define pozolana como um material sílcico ou sílico-aluminoso que quando finamente moído, na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , para formar produtos de hidratação, isto é, compostos com propriedades cimentantes. No caso do pó de tijolo, essas reações decorrem da transformação das estruturas cristalinas dos silicatos de argila em compostos amorfos ao longo da produção do tijolo (ZHU; ZHU, 2020).

As reações envolvendo o pó de tijolo são descritas por Arif *et al.* (2021) pelas equações seguintes:



O pó de tijolo ao reagir com o Ca(OH)_2 liberado na reação rápida, forma produtos de hidratação os quais se desenvolvem nas idades posteriores, caracterizando a reação lenta (ARIF *et al.*, 2021).

Tang *et al.* (2020) fez uma revisão crítica acerca do uso do pó de ARC e do tijolo na substituição do cimento, destacando as etapas de obtenção desses resíduos. Os autores identificaram as etapas de coleta seletiva dos resíduos, a britagem, a separação por faixas granulométricas (diferenciando entre agregados graúdos, miúdos e pó), e posteriormente, a moagem do material mais fino para obtenção do pó final. Salientando-se que por ser um fator de grande relevância, o diâmetro final das

partículas pode ser melhorado a partir da escolha adequada do equipamento e do tempo de moagem.

A composição mineralógica dos pós residuais que substituem o cimento é comumente avaliada a partir da difração de raios-X (DRX). Trata-se de um procedimento usado na determinação da estrutura molecular e atômica de cristais, em que seus átomos cristalinos promovem a difração de um feixe de raio-X em várias direções específicas (LIU *et al.*, 2014).

2.4.1 MICROESTRUTURA DO PÓ E DO CONCRETO

Os produtos de hidratação da pasta de cimento com incorporação do pó de tijolo foram analisados por Chen *et al.* (2022) a partir dos padrões de DRX, identificando a portlandita, etringita e calcita. Notou-se, ainda, que para maiores teores de substituição, o teor de CH era reduzido. Pode-se atribuir esse efeito a uma diminuição da formação de CH durante a hidratação da pasta com substituição de cimento, e ao consumo do CH durante a atividade pozolânica para formação do gel C-S-H ao longo da hidratação secundária.

Em termos de mineralogia, o pó de tijolo é composto especialmente de cristais minerais e substâncias amorfas, com o SiO_2 e o Al_2O_3 estando presente em maior proporção no pó. Simplificadamente, a sílica participa da reação pozolânica e o óxido de alumínio participa da formação de etringita (TANG *et al.*, 2020).

Liu *et al.* (2020) estudaram o efeito da substituição do cimento pelo pó de tijolo em amostras de argamassa, variando-se o teor de substituição em 10%, 20% e 30%. De suas observações, pôde-se identificar que a composição mineralógica do pó residual pode ser um indicativo da origem desse resíduo, tendo sido constatada a presença de quartzo (SiO_2), tobermorita ($\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), gismondina ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) e hematita (Fe_3O_4), o que possivelmente resultou do fato de o pó possuir argamassa aderida, por se tratar de resíduos de demolição. Da análise DRX para o pó de tijolo utilizado no estudo de Ge *et al.* (2012), foram constatadas as fases cristalinas quartzo, rulite e hematita.

Ao estudar os efeitos do pó híbrido de resíduos de concreto e de tijolos na composição das argamassas, Liu *et al.* (2014) identificaram, a partir da fluorescência de raio-X que o Si, Ca e Al são os elementos que representam a maior proporção do pó (aproximadamente 70% do peso total).

Liu *et al.* (2014) relataram a presença de gismondine ($\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), ilita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$), anortita (CaSi_2O_7)- αSiO_2 e carbonato de cálcio (CaCO_3) em suas amostras de pó híbrido de resíduos de concreto e tijolos, evidenciando-se que o αSiO_2 e o CaCO_3 estão relacionados a atividade pozzolânica. Por outro lado, em virtude da alta temperatura de moagem e da carbonatação acelerada, a etringita e o hidróxido de cálcio da pasta de argamassa não estão presentes no pó híbrido.

O efeito do uso do pó de tijolo na microestrutura de concretos e argamassas foi analisado sob várias condições, na literatura. Chen *et al.* (2022) identificaram que aos 56 dias, genericamente amostras de pasta de cimento com substituição de pó de tijolo possuíam quantidade de hidróxido de cálcio (CH) inferior quando comparado com a idade de 7 dias, o que indicou um efeito benéfico do pó de tijolo nas idades posteriores. No entanto, para grandes teores de substituição a resistência das amostras foi comprometida.

A partir da Microscopia Eletrônica de Varredura, foi possível identificar que na presença de CaSO_4 (Cimento Portland) e do material pozzolânico (pó de tijolo), a hidratação do aluminato de cálcio (C3A) produziu etringita na fase AFt (Alumina-Óxido Férrico-Trissulfato), representada por agulhas finas. Observou-se que esses cristais de etringita preencheram os poros do concreto e que o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ foi consumido para a formação de silicato de cálcio hidratado. A espectroscopia de raio-X identificou picos mais altos de Ca e Si nas amostras contendo pó de tijolo, indicando o maior teor de C-S-H, além da presença de Al, indicando a formação de etringita (ARIF *et al.*, 2021).

A revisão crítica de Tang *et al.* (2020) revela que a partir da Microscopia Eletrônica de Varredura, é possível identificar que a microestrutura do pó reciclado é bastante distinta daquela das cinzas volantes, em virtude das partículas escamosas e irregularidades da morfologia. Tal fato, leva a uma redução da trabalhabilidade dos concretos produzidos com esses resíduos. Fazendo uso da microscopia de força atômica (MFA) notou-se que o pó híbrido proveniente de resíduos de ARC e de tijolos afeta a microestrutura da pasta de cimento. A maior rugosidade e contorno visível evidenciaram uma ligação mais fraca dos géis C-S-H em volta do pó híbrido (LIU *et al.*, 2014).

O índice de atividade pozzolânica do pó de tijolo e do pó de ARC foi analisada por Tang *et al.* (2020), constatando-se que o valor médio do índice de atividade é reduzido quando se aumenta o diâmetro médio do pó. Observando-se também uma redução significativa para o índice quando o diâmetro médio do pó é maior que 30 μm .

Escória e pó de tijolo foram misturados para substituir 30% do cimento nos estudos experimentais de Zhao *et al.* (2021), os quais observaram que essa proporção de substituição pode elevar em até 13,7% o valor de pico de hidratação do C3S.

Em função da relação concreto-tijolo do pó híbrido estudado por Liu *et al.* (2014), a atividade pozolânica desses resíduos ocorre em níveis diferentes. Por exemplo, com o aumento da proporção do tijolo na composição do pó, identificou-se que o índice de atividade da resistência da argamassa aumentou. Quando o tijolo representa 40% da composição do pó híbrido, o índice de atividade de resistência se aproxima de 70% para uma substituição do cimento pelo pó em 30%.

Na análise da ZTI, Chen *et al.* (2022) observaram que as rachaduras são bem evidentes para os concretos de ARC. Porém, para uma pequena substituição do cimento pelo pó de tijolo, alguns produtos de hidratação são preenchidos na ZTI em função do refinamento e densificação da microestrutura.

2.4.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO

2.4.2.1 ESTADO FRESCO

Rogers (2011) descreve que a trabalhabilidade dos concretos com substituições pozolânicas é melhorada em virtude de suas reações secundárias, que ocorrem nas idades posteriores e permitem, dessa forma, que uma quantidade excedente de água fique disponível na mistura. No entanto, para as substituições feitas com pó reciclado, efeitos adversos puderam ser observados na literatura. O abatimento do concreto produzido com substituição de cimento pelo pó de tijolo teve redução de 110 mm para 40 mm, o que evidencia a maior demanda de água nessas misturas (AMAKYE; ABBEY; OLUBANWO, 2021).

Ao estudar o efeito do pó híbrido de ARC e de tijolos na composição dos concretos, Liu *et al.* (2014) relataram que a morfologia do pó resulta em maior consumo de água para se manter a trabalhabilidade do concreto, e o pó de tijolo faz com que esse consumo aumente até a proporção de 70% do pó híbrido. Quando a substituição foi feita em pastas de cimento, o abatimento das amostras contendo pó residual de tijolo não sofreu redução significativa nos estudos de Liu *et al.* (2020), mas para compensar o maior consumo de água, fez-se uso de superplastificante a base de policarboxilato.

2.4.2.2 ESTADO ENDURECIDO

Letelier *et al.* (2018) fizeram substituições do cimento pelo pó de tijolo variando entre 5% e 15% e também, substituição do AGN pelo ARC fixada em 30% nas mesmas condições de materiais cimentícios anteriores. Genericamente, pôde-se concluir que a substituição de 15% de cimento pelo pó de tijolo e 30% do AGN pelo ARC não comprometem significativamente as propriedades do concreto. Ficou evidente, também, que o ARC além de apresentar porcentagem de argamassa aderida superior a 50%, possui microfissuras ocasionadas pelo processo de cominuição, fatores esses que influenciariam negativamente na resistência do concreto.

Chen *et al.* (2022) fixaram a substituição do AGN pelo ARC em 60%, alternando a substituição do cimento pelo pó de tijolo de 0 a 40%. A razão a/c foi mantida em 0,45 para todas as amostras de concreto e os ARCs foram pré-molhados de modo a atingirem a condição saturada superfície seca. O tamanho médio das partículas do pó de tijolo e do cimento foi de 5,478 μm e 7,589 μm , respectivamente. Quanto a análise da resistência à compressão, os autores relataram uma melhora dessa propriedade para determinadas amostras nas idades posteriores. Para a idade de 7 dias, as amostras apresentaram desempenho de 0,63% a 43,40% inferior ao concreto que continha apenas ARC. Já aos 56 dias, as amostras com 10% e 20% de substituição de cimento tiveram resistência superior ao concreto contendo apenas ARC de 12,53% e 4,78%, respectivamente. Por outro lado, as amostras de 10% de substituição de cimento apresentaram desempenho inferior ao concreto controle (contendo apenas agregados naturais e cimento) na ordem de 11,37%. As melhorias identificadas para a resistência à compressão do concreto podem ser atribuídas ao efeito de preenchimento que o pó fino de tijolo pode proporcionar, e a superfície adicional fornecida para a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH), por exemplo, resultando na hidratação do cimento.

Amakye, Abbey e Olubanwo (2021) relataram baixa na resistência à compressão em comparação com o concreto controle, mas um aumento expressivo dessa nas idades posteriores, atribuindo-se a esse comportamento, a influência do material residual pozolânico na formação do C-S-H nas idades tardias. Finalmente, os autores sugerem uma substituição de 10% do cimento pelo pó de tijolo.

Essa perda da resistência à compressão foi semelhantemente relatada por Liu *et al.* (2020) na confecção de pastas de cimento. Para a resistência a compressão das

amostras de argamassas, uma substituição de 30% do cimento resultou em perdas que variaram entre 8,7% e 26,3%. Nos ensaios de resistência à compressão feitos com substituição do cimento em 30%, os resultados mostraram que a redução sofrida pelo índice de atividade da resistência, em decorrência da água adicional, não foi significativa. Zhao *et al.* (2021) relataram que a resistência à compressão pôde se desenvolver por um longo período e, nesses estudos, para a idade de 365 dias, foi registrado o valor de 53,5 Mpa. A adição de escória juntamente com o pó de tijolo reduziu a resistência mecânica das amostras nas primeiras idades, no entanto, nas idades posteriores o desenvolvimento da resistência ocorreu de forma mais acelerada

A finura e a estrutura mais porosa do pó de tijolo dificultaram o desenvolvimento da resistência a partir da absorção da água livre da argamassa, o que resultou em dificuldades no processo de hidratação. Semelhantemente a resistência à compressão, o módulo de elasticidade sofreu redução para altos teores de substituição. Porém, uma substituição de 10% mostrou-se benéfica para essa propriedade da argamassa (LIU *et al.*, 2020).

Ainda sobre o comportamento mecânico do concreto, outros estudos puderam obter bons resultados para essa característica. Fazendo uso do método ortogonal, Ge *et al.* (2012), dosaram concretos de alta resistência a partir de substituições de cimento pelo pó de tijolo que variaram entre 10% e 30%, com uma razão água/materiais cimentícios que variou entre 0,26 e 0,32. Para isso, foi utilizado um redutor de água dosado nas proporções de 1,1% a 1,4% do material cimentício. Diferentemente do que foi observado por outros autores para a resistência à compressão do concreto, no 7º dia algumas amostras apresentaram resistência superior à do concreto controle. Aos 28 dias foi possível identificar amostras com resistência superior a 55,1 Mpa, a qual foi a observada para o concreto controle. Pelo método ortogonal identificou-se que, para essa propriedade, a razão a/c teve maior influência nos resultados, porém, o teor de substituição e o tamanho médio das partículas do pó de tijolo têm influência semelhante.

Das propriedades analisadas por Ge *et al.* (2012), o módulo de elasticidade foi a que mais sofreu com a incorporação do pó de tijolo, tendo sido obtidos resultados variando entre 15,2 GPa e 25,3 GPa, contra o concreto controle, com valor de 32,4 GPa. Já para a resistência à flexão, os estudos mostraram que o concreto com incorporação do pó de tijolo poderia manter o mesmo nível de resistência para uma substituição de 10% e a/c de 0,26. A relação entre resistência à flexão e compressão

foi estudada, evidenciando-se a partir do coeficiente de determinação (R^2) de 0,59 que essa relação linear ocorre de forma moderada.

No ensaio de tração por compressão diametral, Amakye, Abbey e Olubanwo (2021) identificaram que a substituição de 10% do cimento pelo pó de tijolo resultou em resistência inferior, mas muito próxima da encontrada para o concreto controle. As substituições de 20% e 30% também representaram perdas pouco significativas da resistência. Letelier *et al.* (2018) identificaram que para as substituições simultâneas de cimento e de AGN a resistência à flexão apresentou perdas superiores a 16% aos 28 dias. Após essa idade, as perdas variaram entre 8% e 16%, o que revela um melhor comportamento do concreto para essa propriedade nas idades posteriores.

Vale destacar ainda o estudo de Khitab *et al.* (2022) com uso de pó de tijolo em substituição parcial do cimento e do resíduo de borracha em substituição parcial da areia. O retardo no desenvolvimento da resistência à compressão também foi observado, mas perdas significativas foram identificadas para esse estudo, variando-se de 35% a 56%.

Como percebido por outros autores, existe um limite de substituição de cimento pelo pó de tijolo que resulta no efeito benéfico de preenchimento dos vazios da microestrutura do concreto. Ao se ultrapassar esse limite, o pó de tijolo passa a ocupar o espaço do cimento, ocasionando a redução da densidade do concreto. Conforme se aumentou o teor de substituição do cimento, tendo sido mantida a substituição de AGN, a resistência à compressão sofreu decréscimo de 20% a 25% nas primeiras idades. Por outro lado, aos 28 dias observou-se um aumento de 4% para a substituição de 5% do cimento pelo pó de tijolo (LETELIER *et al.*, 2018).

2.4.3 DURABILIDADE

No estudo da absorção de água dos concretos produzidos com substituição de AGN e de cimento, Chen *et al.* (2022) observaram que esse efeito é maior para as amostras de concreto com ARC sem substituição de cimento. Curiosamente, ao aumentar o teor de pó de tijolo, inicialmente a absorção é reduzida significativamente para em seguida aumentar lentamente. Isso pode ser explicado a partir da densificação da matriz cimentícia proporcionada pelas reações de hidratação secundárias do pó de tijolo. Quanto a capilaridade, um benefício na absorção pôde ser observado nas substituições de 10%. Constatou-se que para substituições excessivas, os produtos de hidratação provenientes da reação entre o pó de tijolo e

água não conseguem preencher eficazmente os poros estruturais das amostras de concreto com ARC.

No estudo de Khitab *et al.* (2022) a porosidade do concreto também sofreu com as substituições de cimento e areia pelo pó de tijolo e borracha triturada, respectivamente. Após 48 horas, as substituições de 5%, 10% e 15% resultaram em aumento da porosidade de 12,7%, 45% e 51% em relação ao concreto controle, respectivamente. O efeito negativo foi atribuído predominantemente à borracha, que na mistura contribuiu para a formação de vazios, além de ter apresentado uma fraca ligação com a matriz cimentícia.

A penetração de íons cloreto nos concretos com substituição parcial de AGN e cimento foi também avaliada por Chen *et al.* (2022) e, genericamente, a penetrabilidade foi maior nos concretos de ARC do que no concreto controle. Porém, nas substituições de 10% do cimento pelo pó de tijolo, a carga total de íons foi 27,3% inferior à do concreto de ARC sem substituição do cimento. Para percentuais superiores de substituição, a penetração teve novo acréscimo. A reação pozolânica do pó de tijolo proporciona a formação de etringita e monossulfato a partir da sílica e alumina. Além de que, em função da finura do pó de tijolo, a estrutura porosa do concreto é refinada. Esses efeitos resultaram em maior resistência dos concretos de ARC frente à penetração de íons cloreto.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste estudo, buscou-se na literatura as principais conclusões acerca do uso do ARC e do RTM, na composição de concretos, em substituição ao AGN e cimento, respectivamente. Seguindo-se com uma análise experimental que buscou avaliar a resistência mecânica e durabilidade de concretos produzidos com essas substituições.

Para tanto, a matéria prima (RCD) foi coletada, cominuída e caracterizada. Os procedimentos de ensaios adotados para o estudo foram os estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas. Todas as definições de materiais, traços e ensaios são descritos a seguir.

3.1 MATERIAIS

Foi utilizado o cimento Portland CPV de alta resistência inicial (ARI), conforme estabelece a ABNT NBR 16697:2018. A composição da amostragem dos agregados seguiu a recomendação da ABNT NBR NM 26:2009. A redução dessas amostras ocorreu conforme orientação da ABNT NBR NM 27:2001. Pedra britada de rocha gnaisse foi utilizada como agregado graúdo natural (AN), com dimensão máxima característica ($D_{\max}$) de 25 mm, de acordo com critérios estabelecidos pela ABNT NBR NM 248:2003, e massa específica seca de 2799 kg/m³ seguindo a metodologia descrita em ABNT NBR NM 53:2009.

Os limites de distribuição granulométrica para agregado miúdo e graúdo foram obtidos com a ABNT NBR 7211:2009 (figuras 2 e 3). Areia obtida do leito de rio, com massa específica medida a partir da ABNT NBR NM 52:2009 de 3458 kg/m³, $D_{\max}$ de 4,75 mm e módulo de finura 2,50, foi utilizada como agregado miúdo natural, e suas propriedades físicas são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 - Massa específica e módulo de finura da areia

Massa específica aparente agregado seco (Kg/m³)	Massa específica agregado saturado superfície seca (kg/m³)	Massa específica (kg/m³)	Módulo de finura
3391	3411	3458	2,5

Os resíduos cerâmicos de tijolos, utilizados em substituição ao cimento, foram obtidos da construção civil, na cidade de João Pessoa, estado da Paraíba. A figura 5 apresenta as etapas para obtenção do RTM, desde a classificação até a obtenção do pó utilizado nos traços de concreto. Com a classificação, o material selecionado passou pelo processo de britagem no britador de martelos, obtendo-se uma granulometria variada para o resíduo. Seguiu-se com a moagem do material no moinho de bolas, o qual operou com um total de 10.000 rotações, de aproximadamente 60 rpm, com uma razão resíduo/bolas de 0,5. O pó obtido deste último processo foi utilizado nos traços com substituição do cimento, sua composição granulométrica, juntamente da do cimento, foram obtidas por meio de um granulômetro a laser (figura 4).

Resíduos de corpos de prova de concreto, obtidos de um laboratório especializado em tecnologia do concreto, foram reciclados para utilização na

substituição do agregado graúdo natural (AGN). Os procedimentos para obtenção do ARC final são apresentados na figura 6. Após classificação, os resíduos foram britados no britador de mandíbula. O material utilizado foi o passante na peneira de 25 mm e retido na peneira de 6,4 mm, com D_{max} de 25 mm, e massa específica seca de 2618 kg/m³ (tabela 3). A figura 3 apresenta a curva granulométrica do agregado graúdo reciclado de concreto (ARC).

Tabela 3 - Propriedades físicas do agregado graúdo natural e reciclado

Agregado	Dimensão máxima característica (mm)	Massa específica saturada superfície seca (Kg/m ³)	Massa específica seca (Kg/m ³)	Massa específica aparente seca (Kg/m ³)	Absorção (%)
Agregado natural (AGN)	25	2758	2799	2735	0,84
Agregado reciclado (ARC)	25	2382	2618	2237	6,51

Para garantir o abatimento do concreto em 80 ± 20 mm, com classe S50, segundo a ABNT NBR 8953:2015, foi utilizado aditivo superplastificante de alto desempenho MC-PowerFlow 1180, à base de policarboxilatos, de densidade 1,08 kg/L, com a dosagem recomendada sendo $\geq 0,2\%$ e $\leq 5\%$ sobre o peso do cimento. Dessa forma, o teor de superplastificante usado em cada amostra variou em função do abatimento previsto. Por fim, utilizou-se água potável em todos os traços de concreto.

A análise das fases mineralógicas presentes no RTM e no ARC foi feita a partir de difração de raios-X, com radiação $\text{CuK}\alpha$, varredura angular contínua entre 5° e 75° (2θ), velocidade de $2^\circ/\text{min}$, a 30 kV e corrente de 30 mA.

Figura 1 – Peneiramento dos agregados naturais



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 2 – Curva granulométrica da areia

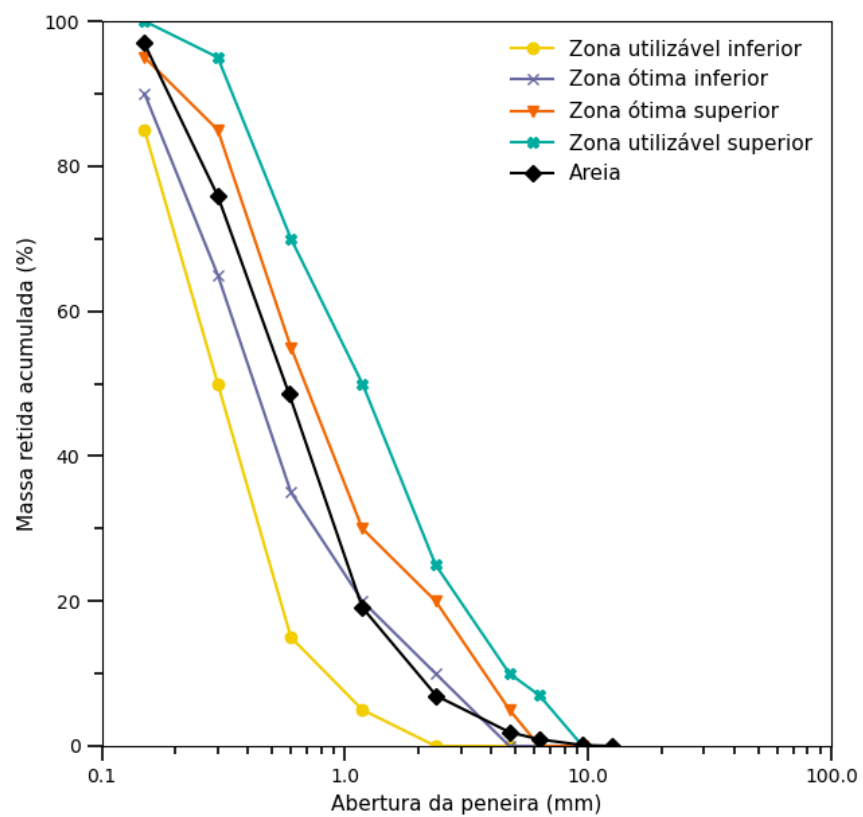


Figura 3 – Curva granulométrica da brita e do ARC

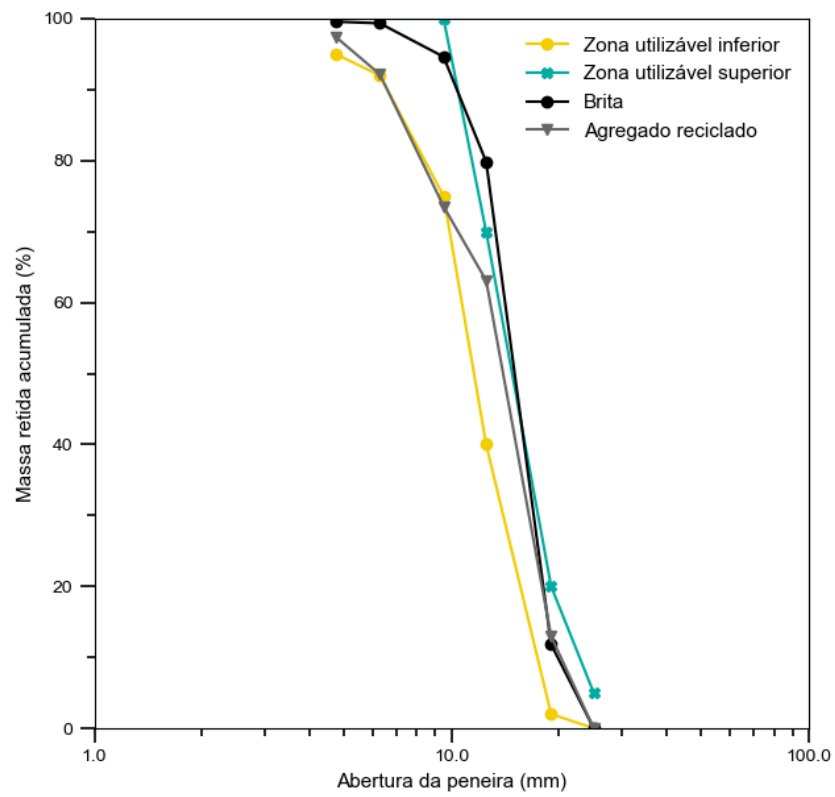


Figura 4 – Curva granulométrica do cimento e do RTM

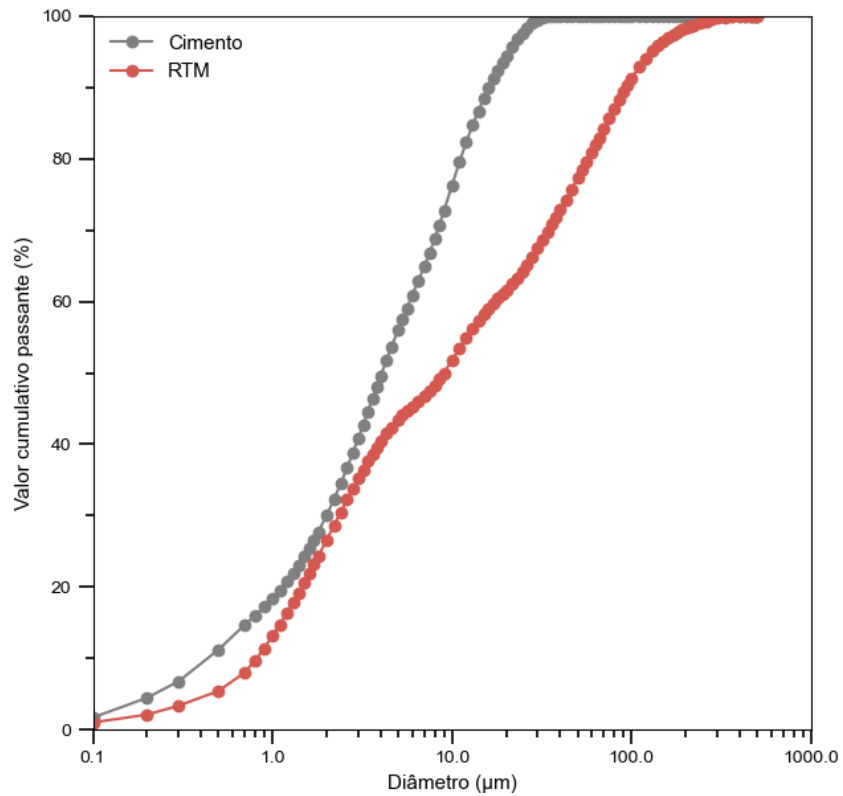


Figura 5 – Etapas para obtenção do RTM



Figura 6 – Etapas para obtenção do ARC



Tabela 4 - Massa unitária dos agregados naturais

Material	Massa unitária solta (kg/m³)	Massa unitária compactada (kg/m³)
Brita	1369	1454
Areia	1569	1626

3.2 AMOSTRAS DE CONCRETO

A dosagem do concreto foi realizada seguindo a metodologia da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), baseando-se na literatura de Ambrozzewicz (2012), e para tanto, seguiu-se com a caracterização física dos materiais utilizados na dosagem. A obtenção das massas unitárias dos agregados naturais ocorreu conforme orientação da ABNT NBR NM 45:2006 (tabela 4). Foi estabelecida a resistência característica do concreto em 25 MPa, obtendo-se 31,6 MPa para a resistência média do concreto aos 28 dias. Fixou-se a razão água/materiais cimentícios em 0,45 e, para obtenção do consumo de água, foram usados como dados de entrada o abatimento requerido e o Dmax da brita. O percentual de agregado graúdo foi obtido em função do módulo de finura da areia e Dmax da brita. Por fim, o consumo de areia foi obtido em função dos consumos de cimento, brita e água.

Para compensar a absorção de água do agregado graúdo reciclado, optou-se por realizar a pré-molhagem deste com 80% de sua taxa de absorção total, conforme recomenda a ABNT NBR 15116:2004, durante 10 minutos.

A mistura do concreto procedeu da seguinte forma: (a) os agregados, no estado seco, bem como a água, cimento, RTM e aditivo foram pesados de acordo com as dosagens estabelecidas; (b) os agregados naturais e reciclados foram introduzidos na betoneira e misturados por 30 segundos; (c) 1/3 do cimento e do RTM foram adicionados à betoneira, juntamente com 1/3 da água, sendo misturados por 1 minuto; (d) o restante do cimento e RTM foi adicionado à betoneira com 1/2 da água restante e misturados por 1 minuto; (e) o aditivo foi adicionado gradativamente com a água restante e misturado por cerca de 1 minuto. A figura 7 (a) e (b) apresentam as amostras no estado fresco e endurecido, respectivamente.

Ao todo, sete séries experimentais foram produzidas. Uma delas com as amostras do concreto controle (C0-0), isento de substituições, seguindo-se com três séries de concretos produzidos com substituição do cimento em 10% (C0-10), 20% (C0-20) e 30% (C0-30), pelo RTM, e mais três séries de concretos produzidos fixando-se a substituição de agregado graúdo natural em 30%, pelo ARC, e variando-se a

substituição do cimento em 10% (C30-10), 20% (C30-20) e 30% (C30-30). As proporções das misturas dos concretos produzidos são apresentadas na tabela 5.

O abatimento do concreto foi medido com a orientação da ABNT NBR NM 67:1998. Posteriormente, seguiu-se com os procedimentos de moldagem e cura do concreto, conforme recomendações da ABNT NBR 5738:2015.

Figura 7 – Moldagem dos corpos de prova (a) e amostras no estado endurecido (b)



Tabela 5 - Proporções das misturas de concreto (kg/m³)

Amostra	a/c teórico	Cimento (Kg)	Brita (Kg)	Areia (Kg)	ARC (Kg)	RTM (Kg)	Água adicional (Kg)	Superplastificante (kg)	Slump (cm)
C0-0	0,45	444	1054	968	-	-	-	1,6	7,0
C0-10	0,45	400	1054	968	-	44	-	2,0	9,0
C0-20	0,45	356	1054	968	-	88	-	2,9	6,0
C0-30	0,45	311	1054	968	-	133	-	2,9	9,0
C30-10	0,45	400	738	968	316	44	17	1,1	10,0
C30-20	0,45	356	738	968	316	88	17	1,6	10,0
C30-30	0,45	311	738	968	316	133	17	1,8	9,5

Tabela 6 - Ensaios para o concreto no estado endurecido

Ensaio	Norma	Idade (dias)	Quantidade de amostras	Forma e tamanho (mm)
Compressão axial	ABNT NBR 5739:2018	7	4	Cilíndrico, Ø 100 x 200
		14	4	
		28	4	
Tração por compressão diametral	ABNT NBR 7222:2011	28	4	Cilíndrico, Ø 100 x 200
Absorção de água por imersão	ABNT NBR 9778:2005	28	3	Cilíndrico, Ø 100 x 200
Absorção de água por capilaridade	ABNT NBR 9779:2012	28	3	Cilíndrico, Ø 100 x 200

Para cada série, foram produzidas vinte e duas amostras, as quais foram ensaiadas no estado endurecido, a fim de se verificar a resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade, seguindo recomendações da ABNT. As idades do concreto para cada ensaio, bem como a quantidade de amostras utilizadas são apresentadas na tabela 6.

3.3 AVALIAÇÃO MECÂNICA

3.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os ensaios de resistência à compressão axial (figura 8) ocorreram de acordo com recomendações da ABNT NBR 5739:2018, com rompimento de 4 corpos de prova, de cada série, nas idades de 7 dias, 14 dias e 28 dias. Foi utilizada a prensa hidráulica Shimadzu. Os resultados apresentados referem-se à resistência média e desvio padrão de cada série.

Figura 8 – Ensaio de resistência à compressão axial



3.3.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral (figura 9), tomou-se como base os procedimentos apresentados na ABNT NBR 7222:2011. À idade de 28 dias, 4 corpos de prova, de cada série, foram ensaiados na prensa hidráulica Shimadzu. A análise final foi feita a partir da média das resistências e desvio padrão.

Figura 9 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



3.4 AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE

3.4.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Nos ensaios de absorção de água por imersão, seguiram-se as recomendações da ABNT NBR 9778:2005. À idade de 28 dias, 3 corpos de prova, de cada série, foram mantidos em estufa à temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, por um período de 72h. Em seguida foram pesados e tiveram suas massas registradas. Posteriormente, foram submergidos em água por um período de 72h. Suas massas submersas e úmidas foram registradas para o procedimento de cálculo.

3.4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

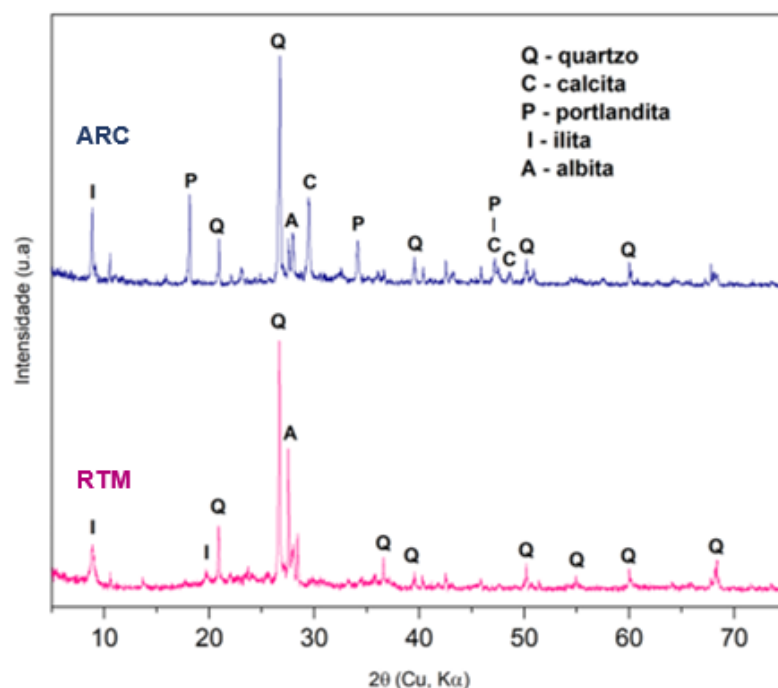
A absorção de água por capilaridade dos concretos foi medida com o auxílio da ABNT NBR 9779:2012. Aos 28 dias, 3 corpos de prova, de cada série, foram mantidos em estufa à temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, por um período de 48h. Após resfriamento das amostras, as massas secas foram registradas e, em seguida, os corpos foram submergidos, parcialmente, à 5 ± 1 mm acima de suas faces inferiores, em recipientes com suportes que garantissem o afastamento entre a face inferior dos corpos e fundo do recipiente, além de proporcionarem o contato efetivo dessas faces com a água. Foram registradas as massas dos corpos de prova após 3h, 6h, 24h, 48h e 72h. Procedeu-se, então, com os cálculos referentes à capilaridade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Para o ARC, constatou-se a presença do quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3), portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ilita ($(\text{K}, \text{H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$), albita ($\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Essas fases eram esperadas, tendo em vista que são comuns em materiais cimentícios, conforme verificado nos estudos de Chen *et al.* (2021), Li *et al.* (2021) e Gonçalves *et al.* (2020). O halo amorfo apresentado entre 26° e 35° pode ser atribuído ao C-S-H, visto que esse composto não possui estrutura cristalina bem definida (BREKAILO *et al.*, 2019). A calcita pode ser atribuída ao fíler calcário presente no cimento anidro, conforme estabelece a ABNT NBR 16697:2018, e à carbonatação da amostra coletada.

Figura 10 – Difração de raios-X do ARC e do RTM



No RTM, registrou-se a presença de quartzo (proveniente da areia), ilita (principal estrutura mineralógica constituinte das argilas, pertencente à família das micas) e albita (pertencente à família dos feldspatos). Esse padrão de DRX é similar aos identificados por Janotka *et al.* (2021), Dang *et al.* (2020), Xiong *et al.* (2019) e Ortega *et al.* (2018). Concordando, também, com Tang *et al.* (2020), tendo em vista que o SiO_2 foi encontrado em maior proporção. A composição mineralógica do pó de

tijolo não apresentou picos de tobermorita ($\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) e gismondina ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), como relatado nos estudos de Liu *et al.* (2020), já que o RTM coletado para o experimento não possuía argamassa aderida.

4.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO

4.2.1 ESTADO FRESCO

4.2.1.1 ABATIMENTO DO CONCRETO

Conforme apresentado na tabela 5, o abatimento previsto foi obtido a partir do uso de superplastificante. Para as substituições feitas apenas com RTM, a porosidade do material resultou em maior consumo de água e consequente perda da trabalhabilidade, valendo-se destacar ainda a influência da variação granulométrica do RTM na absorção desse material. Nesse sentido, não foi observado o mesmo efeito dos estudos de Rogers (2011), o qual identificou melhorias no abatimento. Seguindo a mesma tendência observada por Amakye, Albbeey e Olubanwo (2021), Liu *et al.* (2014) e Liu *et al.* (2020), que relataram perda do abatimento do concreto, esse efeito pode ter sido ocasionado ainda pela morfologia do pó.

Figura 11 – Ensaio de abatimento (*slump*)



Para as séries de concreto com substituição de agregado graúdo, observou-se que abatimentos maiores foram obtidos com menores quantidades de aditivo, o que provavelmente resultou da pré-molhagem do agregado graúdo reciclado, elevando o fator água/materiais cimentícios. Mesmo assim, concordando com Silva, Brito e Dhir (2018), a angularidade e rugosidade do ARC fez com que superplastificante fosse utilizado para que fosse compensada a maior necessidade de água na mistura.

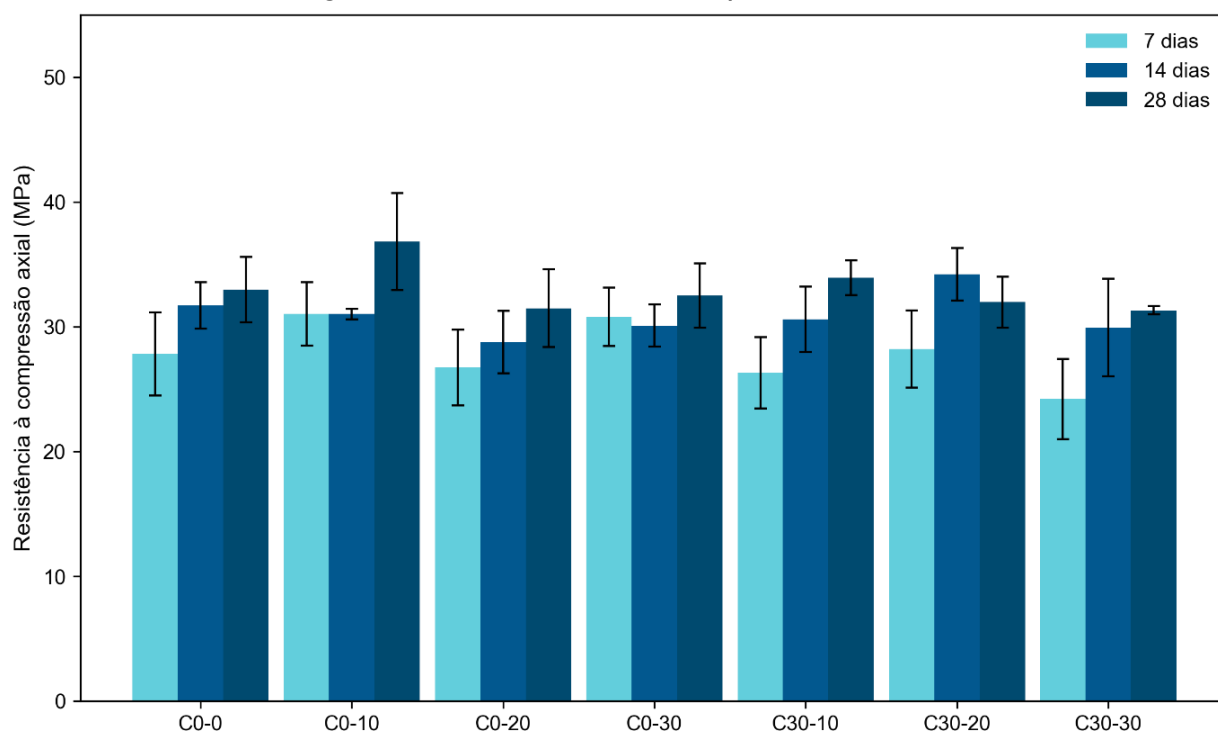
Para os dois métodos de substituições, a perda do abatimento se deu de forma progressiva, tendo sido observada uma variação máxima no uso do superplastificante de aproximadamente 45% para as amostras C0-20 e C0-30 em relação ao concreto controle C0-0.

4.2.2 ESTADO ENDURECIDO

4.2.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Aos 28 dias, todas as séries de concreto apresentaram resistência superior a 25 MPa, resistência característica adotada neste estudo experimental, tendo sido ela atingida ainda aos 14 dias para todas as amostras. Em todas as séries (figura 12), o uso de superplastificante possibilitou a redução do fator água/materiais cimentícios, consequentemente melhorando a pasta de cimento e acelerando o desenvolvimento da resistência a partir de uma hidratação mais rápida.

Figura 12 – Resistência à compressão axial



Aos 7 dias, os traços C0-10, C0-30 e C30-20 apresentaram resistência superior ao concreto controle (C0-0) em 11,5%, 10,7% e 1,4%, respectivamente. A maior resistência registrada aos 28 dias foi para o concreto C0-10, com 36,8 MPa, tendo sido percebida ligeira variação em sua resistência de 7 e 14 dias quando observado o

desvio padrão. O maior desenvolvimento da resistência em idades posteriores e o melhor desempenho do concreto para pequenas substituições do cimento pelo pó de tijolo concordam com alguns estudos (LETELIER *et al.*, 2018; CHEN *et al.*, 2022; AMAKYE; ABBEY; OLUBANWO, 2021; LIU *et al.*, 2020). As amostras C30-30 tiveram a menor resistência aos 28 dias, com 31,3 MPa, uma redução de 5% em relação ao concreto controle para essa idade. Esse resultado representa uma melhoria quando comparado com o registrado por Alexandridou, Angelopoulos e Coutelieris (2018), com redução de até 37% na resistência, e Medjigbodo *et al.* (2018), com decréscimos de 9,2% e 12,1% para 30% e 100% de substituição de ARC, respectivamente.

A redução percebida na resistência das amostras com substituição de cimento ou de cimento e agregado graúdo não foi significativa. A substituição em até 10% do cimento pelo pó residual de tijolo resultou no melhor desempenho dos concretos e, portanto, mostrou ser benéfica essa proporção. Para substituição de 20% e 30% do cimento, C0-20 e C0-30, respectivamente, as resistências alcançadas foram muito próximas da resistência registrada para C0-0 aos 28 dias, de 33 MPa. A distribuição granulométrica do RTM, apresentada na figura 4, é um fator que pode ter interferido negativamente em sua atividade pozolânica, tendo em vista que apesar de ter sido registrada a granulometria média de 31,86 μm , para valores cumulativos de aproximadamente 100%, grãos da ordem de 360 μm foram identificados. À 90% do total acumulado, essa granulometria foi da faixa de 92,94 μm . Tang *et al.* (2020) relataram que para diâmetro médio superior a 30 μm , o índice de atividade pozolânica do pó de tijolo é reduzido significativamente. Por outro lado, o resultado aos 28 dias para a amostra C0-10, leva a conclusão de que a proporção mais fina do RTM pode ter resultado tanto no efeito de micropreenchimento dos vazios da matriz de cimento, como na reação pozolânica tardia para formação dos produtos de hidratação do concreto.

Seguindo a tendência dos estudos de Chen *et al.* (2022) e Letelier *et al.* (2018), para os traços C30-10, C30-20 e C30-30, é percebida a queda na resistência aos 28 dias conforme se aumentam o teor de substituição. No entanto, observou-se resistência de 34 MPa para as amostras C30-10, valor levemente superior ao da série C0-0. Observa-se ainda que as resistências de 28 dias para C30-20 e C30-30 são similares às percebidas para C0-20 e C0-30 na mesma idade. Um dos fatores que podem ter contribuído de forma benéfica para a resistência das séries C30-10, C30-20 e C30-30 foi a granulometria do ARC, que como apresentada na figura 3, é mais

indicada para o uso na produção de concretos quando comparada com a do AGN, segundo a ABNT NBR 7211:2009. Junto a isso, a forma rugosa característica do ARC, pode ter influenciado positivamente na aderência à pasta de cimento. Por outro lado, a pré-molhagem realizada no ARC foi um fator que pode ter contribuído negativamente para a resistência dos concretos. Nos estudos de Barra de Oliveira e Vazquez (1998), percebeu-se que na mistura do concreto, a água absorvida pelo agregado reciclado eventualmente pode se mover em direção à matriz do cimento, o que conseqüentemente cria uma região de elevado fator a/c, resultando em maior porosidade, podendo enfraquecer a ligação do agregado com a matriz de cimento.

Mehta e Monteiro (2014) atentam para a influência da zona de transição interfacial (ZTI) nas principais propriedades do concreto, dentre elas a resistência a compressão. O uso de agregado graúdo reciclado na composição dos concretos resulta em uma dupla zona de transição, uma primeira, decorrente da argamassa antiga aderida à pedra britada, e a segunda localizada entre a matriz de cimento e o agregado reciclado com argamassa antiga. Tal configuração cristalográfica singular, juntamente com o teor de material pulverulento dos agregados (tabela 7), especificado pela ABNT NBR NM 46:2003, tiveram influência negativa na resistência do concreto.

Tabela 7 - Teor de materiais pulverulentos (%)

Areia	Brita	ARC
2,93	0,35	3,66

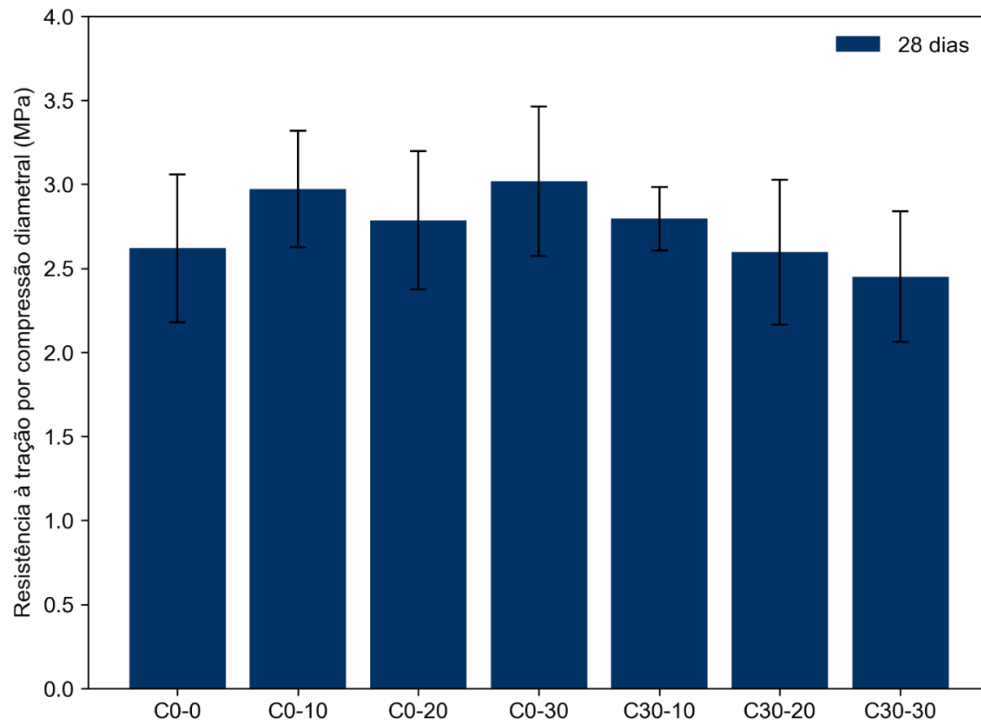
O enfraquecimento da ZTI foi relatado, também, por Ferreira, Brito e Barra (2011), ao estudarem o efeito da pré-saturação do ARC na resistência do concreto. Chen *et al.* (2022) percebeu que a ZTI dos concretos produzidos com ARC possuem rachaduras bastante evidentes, as quais podem ser melhoradas com incorporação do pó de tijolo a partir da densificação e refinamento da microestrutura. Esse efeito pode ter influenciado nas amostras de ARC, fazendo com que a perda de resistência à compressão não tenha sido expressiva.

4.2.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A resistência à tração por compressão diametral das amostras com substituição variou entre 2,5 e 3 MPa (figura 13). Em comparação com o concreto controle C0-0, o resultado mais baixo foi observado para as amostras C30-30, com resistência média

6,9% inferior. A resistência mais alta foi observada nas amostras C0-30, com média de 3 MPa.

Figura 13 – Resistência à tração por compressão diametral



Para as amostras com substituição apenas do cimento (C0-10, C0-20 e C0-30), não houve relação clara entre a resistência e o teor de substituição ou teor de superplastificante utilizado. Efeito diferente ocorre nas amostras com substituição de AGN e de cimento (C30-10, C30-20 e C30-30), percebendo-se suave decréscimo da resistência conforme se tem o aumento da taxa de substituição do cimento. No entanto, os resultados obtidos são semelhantes aos observados no estudo de Katar *et al.* (2021) para concretos auto-adensáveis produzidos com agregado graúdo reciclado. Comparativamente com outros tipos de substituições apresentados na literatura, valores aproximados de 4,25 MPa foram obtidos por Rasool, *et al.* (2020) ao substituir em 30% o cimento por limalha de ferro e variando-se em até 15% a substituição do agregado miúdo pelo RTM. Perdas mais significativas foram identificadas por Abreu, Evangelista e Brito (2018) para essa resistência (da ordem de 19,4%) ao substituírem o AGN pelo ARC em 25% e 100%, demonstrando que, para baixo teor de substituição, essa propriedade não é influenciada negativamente de forma expressiva.

4.3 DURABILIDADE

4.3.1 ABSORÇÃO POR IMERSÃO

A permeabilidade do concreto é uma característica ligada à sua durabilidade, tendo em vista que a água atua no transporte de substâncias nocivas para o interior das estruturas de concreto. Para este estudo, os resultados obtidos para os ensaios de absorção por imersão compreendem a identificação das massas específicas, absorção das amostras, bem como o índice de vazios (tabela 8).

Tabela 8 - Propriedades físicas dos concretos produzidos

Amostra	Massa específica saturada (kg/m ³)	Massa específica seca (kg/m ³)	Massa específica real (kg/m ³)	Absorção (%)	Índice de vazios (%)
C0-0	2350	2234	2527	5,2	11,6
C0-10	2379	2269	2550	4,9	11,0
C0-20	2388	2266	2579	5,4	12,1
C0-30	2399	2291	2568	4,7	10,8
C30-10	2404	2260	2639	6,4	14,4
C30-20	2394	2258	2614	6,0	13,6
C30-30	2399	2252	2641	6,5	14,7

Observou-se a redução da absorção das séries C0-10 e C0-30 em relação à C0-0, o que pode ser explicado pelo efeito de micropreenchimento da matriz de cimento pelo pó de tijolo, atestado a partir dos valores obtidos para a massa específica seca dessas amostras, as quais superam à do concreto controle. Esse mesmo efeito de micropreenchimento foi observado por Letelier *et al.* (2018) para as amostras contendo apenas substituição do cimento, e corrobora com os estudos já apresentados que identificaram a densificação da matriz de cimento para pequenas taxas de substituição do cimento pelo pó do tijolo.

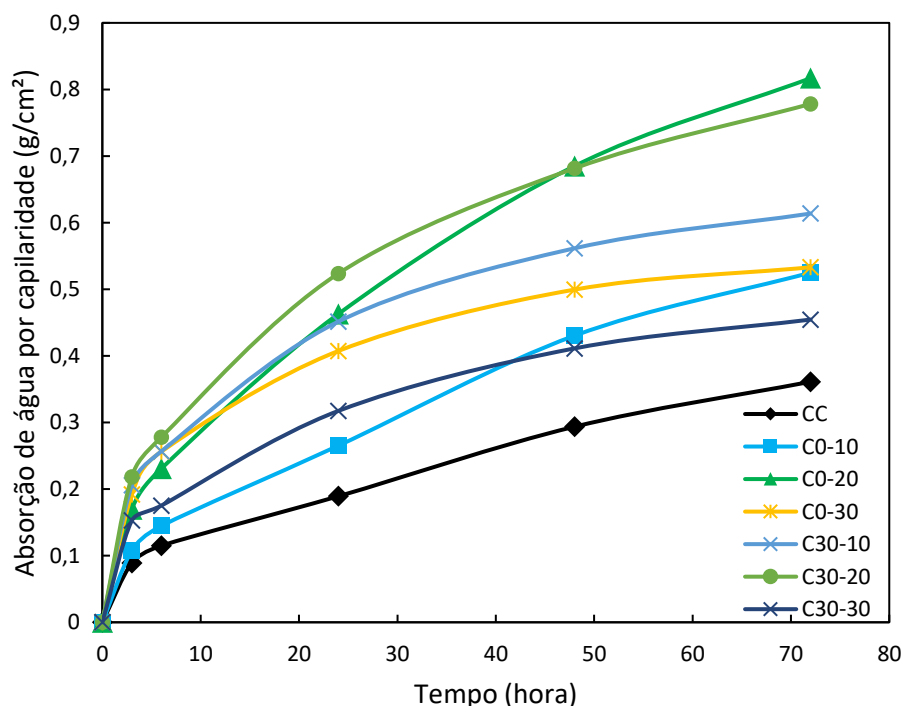
Por outro lado, as séries C30-10, C30-20 e C30-30 tiveram aumento considerável da absorção por imersão em relação ao concreto. Isso pode ser explicado principalmente pela maior absorção do ARC em relação ao AGN. Além disso, a pré-molhagem do AGN, durante a mistura, possivelmente resultou no aumento da relação a/c, prejudicando a matriz de cimento, resultando em maior porosidade da matriz. Isso pode ser confirmado a partir da observação dos maiores índices de vazios e de massa específica saturada, identificados para essas séries. Os

valores obtidos para a absorção do concreto foram inferiores aos encontrados no estudo de Soares *et al.* (2014), que para a substituição de 25% do AGN pelo ARC, registrou absorção de 15,5%.

4.3.2 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

O resultado dos ensaios realizados para a absorção por capilaridade dos concretos é apresentado na figura 14. Para as primeiras 6 horas, é perceptível a relação existente entre o teor de substituição e a capilaridade dos corpos de prova, com exceção da série C30-30. Passadas as 72 horas, tal relação deixou de existir. A série C0-20 teve aumento da absorção de 126% em relação ao C0-0.

Figura 14 – Absorção por capilaridade



Ao fim do ensaio, a série C30-30 apresentou a menor taxa de crescimento em relação ao C0-0, sendo ela de 26%. Esse comportamento não ocorre progressivamente para diferentes teores de substituição. A série C30-20 teve aumento de 116%, enquanto os concretos C0-10 tiveram aumento de 45%. Dessa forma, torna-se improvável o efeito benéfico ou nocivo em função da dosagem ou microestrutura do concreto. Sendo pertinente atribuir esses resultados a possíveis vícios de qualidade das amostras moldadas no ato experimental, bem como das condições ambientais do local de execução do ensaio.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A literatura indicou que para as principais propriedades do concreto, apesar de não terem sido observadas melhorias em relação aos grupos de controle na maior parte dos estudos, substituições variando entre 10% e 15% do cimento pelo RTM mostraram-se benéficas para concretos produzidos com substituição do AGN pelo ARC. Além disso, as propriedades relacionadas à durabilidade dos concretos tiveram influência das substituições feitas com RTM. Com o aumento da substituição, a absorção de água reduz e depois aumenta, indicando que o efeito de micropreenchimento só pode ser observado para pequenas substituições.

Os experimentos realizados nesse trabalho tiveram por objetivo avaliar a resistência mecânica e características de durabilidade de concretos produzidos com resíduos de construção e demolição (RCD). As principais conclusões foram as seguintes:

- A incorporação do RCD nos concretos produzidos demandou maior quantidade de água. E para manter fixa a relação a/c , o uso de aditivo superplastificante promoveu o abatimento estabelecido na dosagem do concreto;
- Todas as séries produzidas apresentaram resistência à compressão axial superior a 25 MPa aos 28 dias. Não tendo sido observadas reduções significativas na resistência à compressão em função da incorporação do RTM e do ARC. A maior resistência foi observada para a série C0-10, indicando que a substituição do cimento melhorou essa propriedade do concreto a partir do adensamento da matriz de cimento;
- A resistência à tração por compressão diametral não foi significativamente comprometida pela incorporação de RCD nas misturas de concreto, com resistência variando entre 2,5 e 3 MPa. Tendo sido observada a relação direta entre o teor de substituição e a resistência à tração apenas para as séries compostas por ARC;
- A incorporação de RCD resultou no aumento da absorção e índice de vazios das amostras C30-10, C30-20 e C30-30. No entanto, para as séries C0-10 e C0-30, a substituição do cimento pelo RTM mostrou-se benéfica, com provável adensamento da matriz de cimento e consequente redução da porosidade.

Portanto, o estudo apresentou resultados satisfatórios para o desempenho do concreto, mas novas pesquisas devem ser incentivadas a fim de estabelecer técnicas para a gestão dos resíduos e métodos que garantam uma melhor qualidade do RCD a ser empregado na produção de concretos, de modo que se possa atingir maior grau de confiabilidade com a reinserção desses materiais na cadeia produtiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017**. 2017. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf> Acesso em: 7 set. 2022.

ABREU, Vilson; EVANGELISTA, Luís; BRITO, Jorge. The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 480-489, 2018.

AKHTAR, Ali; SARMAH, Ajit K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262-281, 2018.

ALBERTE, Elaine Pinto Varela; HANDRO, Julia Barretto. Estado do conhecimento acerca de especificações técnicas e normativas para agregados reciclados de RCD. **Ambiente Construído**, v. 21, p. 305-320, 2021.

ALEXANDRIDOU, Christiana; ANGELOPOULOS, George N.; COUTELIERIS, Frank A. Mechanical and durability performance of concrete produced with recycled aggregates from Greek construction and demolition waste plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 176, p. 745-757, 2018.

AMAKYE, S. Y.; ABBEY, S. J.; OLUBANWO, A. O. Consistency and mechanical properties of sustainable concrete blended with brick dust waste cementitious materials. **SN Applied Sciences**, v. 3, n. 4, p. 1-12, 2021.

AMBROZZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório**. São Paulo: PINI, 2012.

ANGULO, S. C.; ULSEN, C.; LIMA, F. M. R. S.; CHAVES, A. P.; JOHN, V. M. Processamento de resíduos de construção e demolição em usinas de reciclagem européias. In: Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2009b. Porto Alegre. **Anais**, Porto Alegre, 2009.

ARIF, R. *et al.* Experimental analysis on partial replacement of cement with brick powder in concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00749, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: **Materiais pozolânicos**: Rio de Janeiro, 2014 (Revisão 2015).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116: **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: **Cimento Portland: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto: Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: **Concreto e argamassa: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: **Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779: **Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: **Agregados: Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 26: **Agregados: Amostragem**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 27: **Agregados: Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: **Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 46: **Agregados: Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: **Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: **Agregado graúdo: Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67: **Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

BANIAS, Georgios *et al.* Assessing multiple criteria for the optimal location of a construction and demolition waste management facility. **Building and environment**, v. 45, n. 10, p. 2317-2326, 2010.

BAPTISTA JÚNIOR, Joel Vieira; ROMANEL, Celso. Sustentabilidade na indústria da construção: uma logística para reciclagem dos resíduos de pequenas obras. Urbe. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 5, p. 27-37, 2013.

BARBUDO, Auxi *et al.* Recommendations for the management of construction and demolition waste in treatment plants. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 1, p. 125-132, 2020.

BARRA, M. **Study of the durability of recycled aggregates concrete applied to structural purposes**. Tese de Doutorado. PhD thesis, Polytechnic University of Catalonia, Barcelona, 1996.

BARRA DE OLIVEIRA, M.; VAZQUEZ, E. Properties of concretes with recycled aggregates: influence of properties of the aggregates and their interpretation. *In: Proceeding of the International Symposium on Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*, p. 19-30. 1998.

BRASIL. 2002. **Resolução CONAMA nº 307** - Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 17 de julho de 2002. Seção 1, p. 95-96.

BRASIL. **Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 10 set. 2022.

BREKAILO, F. *et al.* Avaliação do potencial reativo de adições de resíduos de blocos de cerâmica vermelha e de concreto cominuído de RCD em matriz cimentícia. **Cerâmica**, v. 65, p. 351-358, 2019.

BRITO, J. *et al.* Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 6, p. 1-16, 2016.

BRITO, Jorge; AGRELA, Francisco; SILVA, Rui Vasco. Legal regulations of recycled aggregate concrete in buildings and roads. In: **New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete**. Woodhead Publishing, p. 509-526, 2019.

CARRIJO, Priscila Meireles. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CHEN, X. *et al.* Sustainable reuse of ceramic waste powder as a supplementary cementitious material in recycled aggregate concrete: mechanical properties, durability and microstructure assessment. **Journal of Building Engineering**, v. 52, p. 104418, 2022.

CHEN, Xi; LU, Weisheng. Identifying factors influencing demolition waste generation in Hong Kong. **Journal of cleaner production**, v. 141, p. 799-811, 2017.

CHEN, X. *et al.* Utilization of Recycled Concrete Powder in Cement Composite: Strength, Microstructure and Hydration Characteristics. **Journal of Renewable Materials**, v. 9, n. 12, p. 2189-2208, 2021.

CLARK, Corrie; JAMBECK, Jenna; TOWNSEND, Timothy. A review of construction and demolition debris regulations in the United States. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 36, n. 2, p. 141-186, 2006.

CONSTRUBUSINESS. **A cadeia produtiva da construção acelerando a retomada brasileira pós-pandemia**. In: 14º Congresso Brasileiro da Construção. São Paulo: FIESP/CIESP, 2021. Disponível em: <<https://www.fiesp.com.br/observatoriodaconstrucao/congresso-brasileiro-da-construcao/>>. Acesso em: 7 set. 2022.

CONTRERAS, M. *et al.* Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 594-600, 2016.

DANG, J. *et al.* Durability and microstructural properties of concrete with recycled brick as fine aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 262, 120032, 2020.

EPA. **Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Fact Sheet**. Assessing Trends in Material Generation and Management in the United States, 2020. Disponível em: <<https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/advancing-sustainable-materials-management>>. Acesso em: 7 set. 2022.

FERREIRA, Luis; BRITO, Jorge; BARRA, Marilda. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. **Magazine of Concrete Research**, v. 63, n. 8, p. 617-627, 2011.

GANGULY, Prabir. Construction and demolition waste handling in the EU. **Littera Scripta**, v. 5, n. 2, p. 205-217, 2012.

GE, Z. *et al.* Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 289-293, 2012.

GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner production**, v. 114, p. 11-32, 2016.

GINGA, C. P; ONGPENG, J. M; DALY, M. K. M. Circular economy on construction and demolition waste: A literature review on material recovery and production. **Materials**, v. 13, n. 13, p. 2970, 2020.

GONÇALVES, T. *et al.* Mechanical and durability performance of mortars with fine recycled concrete aggregates and reactive magnesium oxide as partial cement replacement. **Cement and Concrete Composite**, v. 105, 103420, 2021.

HANSEN, T. C. Recycled of demolished concrete and masonry. **Report of Technical Committee**, p. 1-160, 1992.

HAWLITSCHKE, Gustav. **Caracterização das propriedades de agregados miúdos reciclados e a influência no comportamento reológico de argamassas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. doi:10.11606/D.3.2014.tde-22052015-150106. Acesso em: 01. nov. 2022.

HUANG, Beijia *et al.* Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 129, p. 36-44, 2018.

JAIN, Sourabh; SINGHAL, Shaleen; JAIN, Nikunj Kumar. Construction and demolition waste generation in cities in India: an integrated approach. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 12, n. 5, p. 333-340, 2019.

JANOTKA, I. *et al.* Design of Concrete Made with Recycled Brick Waste and Its Environmental Performance. **Minerals**, v.11, n. 5, 463, 2021.

JIN, Ruoyu; CHEN, Qian. Investigation of concrete recycling in the US construction industry. **Procedia Engineering**, v. 118, p. 894-901, 2015.

KATAR, I. *et al.* Mechanical Properties of Concrete with Recycled Concrete Aggregate and Fly Ash. **Recycling**, v. 6, n. 23, 2021.

KHITAB, A. *et al.* Mechanical, thermal, durability and microstructural behavior of hybrid waste-modified green reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, v. 344, p. 128184, 2022.

LETELIER, V. *et al.* Influence of waste brick powder in the mechanical properties of recycled aggregate concrete. **Sustainability**, v. 10, n. 4, p. 1037, 2018.

LEVY, Salomon Mony. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. 1997. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

LI, S. *et al.* Investigation of using recycled powder from the preparation of recycled aggregate as a supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 267, 120976, 2021.

LIU, Q. *et al.* Investigation of using hybrid recycled powder from demolished concrete solids and clay bricks as a pozzolanic supplement for cement. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 754-763, 2014.

LIU, Q. *et al.* Utilization potential of aerated concrete block powder and clay brick powder from C&D waste. **Construction and Building Materials**, v. 238, p. 117721, 2020.

MAZHOU, Brahim *et al.* Influence of residual mortar volume on the properties of recycled concrete aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 57, p. 104945, 2022.

MEDJIGBODO, Sonagnon *et al.* How do recycled concrete aggregates modify the shrinkage and self-healing properties?. **Cement and Concrete Composites**, v. 86, p. 72-86, 2018.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2.ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO, A. V. S. **Diretrizes para a produção de agregado reciclado em usinas de reciclagem de resíduos da construção civil**. Salvador, 2011. Tese (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbano) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

NUNES, K. R. **Avaliação de investimentos e desempenho de centrais de reciclagem para resíduos sólidos de construção e demolição**. Rio de Janeiro: IBAM, 2004.

ORTEGA, J. M. *et al.* Long-term effects of waste brick powder addition in the microstructure and service properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 182, p. 691-702, 2018.

POON, Chi Sun; KOU, S. C.; LAM, L. Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. **Materials and Structures**, v. 40, n. 9, p. 981-988, 2007.

RASOOL, D. A.; ABDULKAREM, M. A.; ABDULREHMAN, M. A. The Effect of Adding Recycled Waste on the Mechanical Properties of Concrete. *In*: **Defect and Diffusion Forum**, v. 398, p. 83-89, 2020.

ROBAYO-SALAZAR, Rafael A.; VALENCIA-SAAVEDRA, William; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby. Construction and demolition waste (CDW) recycling—As both binder and aggregates—

In alkali-activated materials: A novel re-use concept. **Sustainability**, v. 12, n. 14, p. 5775, 2020.

ROGERS, S. B. **Evaluation and Testing of Brick Dust as a Pozzolanic Additive to Lime Mortars for Architectural Conservation**. (Masters Thesis). University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, 2011.

SALGADO, F. de A. S, Fernanda; SILVA, F. de A. Flávio. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 52, p. 104452, 2022.

SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 19-31, 2018.

SOARES, D. *et al.* Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 263-272, 2014.

TANG, Q. *et al.* The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103807, 2020.

THOMAS, C.; SETIÉN, J.; POLANCO, J. A. Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 536-546, 2016.

VILLAGRÁN-ZACCARDI, Yury A. *et al.* Complete re-utilization of waste concretes–Valorisation pathways and research needs. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 177, p. 105955, 2022.

WANG, Bo *et al.* A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 171, p. 105565, 2021.

WE FORUM. **Shaping the future of construction: a breakthrough in mindset and technology**. World Economic Forum, 2016. Disponível em: <<https://www.weforum.org/reports/shaping-the-future-of-construction-a-breakthrough-in-mindset-and-technology/>>. Acesso em: 7 set. 2022.

XIAO, JianZhuang; LEI, Bin; ZHANG, ChuanZeng. On carbonation behavior of recycled aggregate concrete. **Science China Technological Sciences**, v. 55, n. 9, p. 2609-2616, 2012.

XIONG, C. Experimental investigation on recycled clay brick powder as a sand replacement in LFC. **Magazine of Concrete Research**, v. 71, n. 23, p. 1206-1217, 2019.

YA'COB, A. S. *et al.* Factors that affect sustainable construction waste management efforts at site. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 179, p. 1169-1176, 2013.

YUAN, Hongping; SHEN, Liyin. Trend of the research on construction and demolition waste management. **Waste management**, v. 31, n. 4, p. 670-679, 2011.

ZHAO, Y. *et al.* Combined effect of slag and clay brick powder on the hydration of blended cement. **Construction and Building Materials**, v. 299, p. 123996, 2021.

ZHU, L.; ZHU, Z. Reuse of clay brick waste in mortar and concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2020, p. 1-11, 2020.