

SUBMETIDO 12/09/2022

APROVADO 08/11/2022

PUBLICADO ON-LINE 19/11/2022

PUBLICADO 10/07/2024


EDITORA ASSOCIADA

Nelma Mirian Chagas Araújo Meira

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2022id7242>

ARTIGO ORIGINAL

## Estudo da tensão de aderência entre barras de aço e concretos com resíduos de construção civil

 José Eduardo Queiroz Simões <sup>[1]\*</sup>

 Raphael Saverio Spozito <sup>[2]</sup>

 Isabella Silva Menezes <sup>[3]</sup>

[1] [jeq.simoes@gmail.com](mailto:jeq.simoes@gmail.com)

[2] [rspozito@ifsp.edu.br](mailto:rspozito@ifsp.edu.br)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Votuporanga, São Paulo, Brasil

[3] [ec.isabellasm@gmail.com](mailto:ec.isabellasm@gmail.com)

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, São Paulo, Brasil

**RESUMO:** Devido aos impactos causados ao meio ambiente, a construção civil procura soluções que minimizem essa consequência. Entre as diversas possibilidades, destaca-se a utilização de resíduos gerados pela construção civil, sendo imprescindível o entendimento do comportamento mecânico desse tipo de material. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a tensão de aderência entre armadura longitudinal e a matriz de concreto produzida com agregados mistos, obtidos pela substituição parcial do agregado miúdo natural por agregado proveniente de resíduos da construção civil (RCC). Para tanto, foram produzidas misturas de concreto com substituição dos agregados miúdos naturais (AN) pelos agregados de resíduos nas proporções de 0%, 10%, 25% e 50%. Foram produzidos 25 corpos de prova para cada um dos traços, sendo 10 deles com segmentos de barra de aço, esta com diâmetro de 10 mm, os quais foram inseridos na concretagem, para a realização de ensaios de arrancamento "pull-out tests". A resistência média mínima de aderência estipulada pela RILEM – CEB – FIP (1983) de 6,8 MPa foi atingida em todos os corpos de prova ensaiados. Além do aumento na resistência mecânica à compressão e à tração por compressão diametral, os resultados indicaram a viabilidade de substituição dos agregados naturais por agregados de resíduos, com aumentos de, aproximadamente, 20% na resistência de aderência em corpos de prova com teor de substituição igual a 10%.

**Palavras-chave:** agregado miúdo; concreto; pull-out test; resíduos da construção civil; tensão de aderência.

### *Study of bond stress between steel bars and concrete with civil construction waste*

**ABSTRACT:** Due to the impacts caused to the environment, civil construction seeks solutions that minimize this consequence. Among the various possibilities, the use of waste generated by civil construction stands out, being essential to understand the mechanical behavior of this type of material. In this context, this paper aims to evaluate the bond stress between longitudinal reinforcement and concrete matrix produced with mixed aggregates obtained

\*Autor para correspondência.

by partial replacement of natural fine aggregate by aggregate from civil construction waste (CCW). For this purpose, concrete mixtures were produced with the replacement of natural fine aggregates (NA) by waste aggregates in the proportions of 0%, 10%, 25%, and 50%. Twenty-five specimens were produced for each of the mixes, 10 of them with steel bar segments of 10 mm diameter inserted for pull-out tests. The minimum average bond strength stipulated by RILEM – CEB – FIP (1983) of 6.8 MPa was reached in all test specimens. In addition to the increase in compressive strength and tensile strength by diametrical compression, the results indicated the feasibility of replacing natural aggregates by waste aggregates with increases of approximately 20% in bond strength in specimens with replacement content equal to 10%.

**Keywords:** bond stress; civil construction waste; concrete; fine aggregate; pull-out test.

## 1 Introdução

O estudo da utilização de materiais alternativos para a construção civil se intensificou no meio acadêmico pela necessidade da sustentabilidade. O uso de resíduos para produção de concretos, principalmente para fins estruturais, vem se apresentando viável, atendendo aos requisitos mínimos exigidos para concretos estruturais (Anoni; Trigo; Pietrobon, 2020; Pimentel *et al.*, 2020). Indo além, o uso de agregados reciclados também gera benefícios para a economia, o meio ambiente e a sustentabilidade da indústria da construção.

As regulamentações que promovem e propõem soluções para a destinação adequada dos resíduos da construção civil no Brasil são a Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), a Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelecida pela Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010) e a NBR 15113 (ABNT, 2004). Na Europa, os agregados reciclados são amplamente utilizados, porém, no Brasil, a realidade é diferente. Apesar da existência de inúmeras pesquisas para o uso de resíduos da construção civil na produção de elementos de concreto, sua aplicação ainda é restrita aos concretos sem função estrutural, conforme citam Pimentel *et al.* (2020).

Na literatura, estudos sobre a resistência de aderência entre barras de aço e concreto foram, em sua maioria, realizados com a substituição dos agregados graúdos por RCC (Baena *et al.*, 2016; Kim; Yun, 2013; Oliveira; Assis, 2006; Siempu; Pancharthi, 2017; Xiao; Falkner, 2007; Yang; Deng; Ingham, 2016), sendo escassas as pesquisas que utilizam a substituição dos agregados miúdos por resíduos da construção (Siempu; Pancharthi, 2017). Há evidências de que as vigas de concreto com substituição de agregados miúdos naturais por RCC apresentam comportamentos de ruptura semelhantes, quando comparadas às mesmas estruturas constituídas por concretos convencionais (Dong *et al.*, 2019).

Além de ser mais sustentável, concreto produzido com RCC apresenta a vantagem de gerar um elevado empacotamento dos vazios, devido à grande quantidade de finos presentes na mistura, resultando em um melhor desempenho na resistência mecânica (Anoni; Trigo; Pietrobon, 2020). Há, no entanto, também desvantagens. Uma delas é a falta de homogeneidade em sua composição (Bins *et al.*, 2022), ocorrendo uma variabilidade de resultados na literatura. Como exemplo, tem-se Sousa *et al.* (2021), cujos estudos mostraram que a substituição de agregados graúdos por RCC, em concretos, apresentou uma desvantagem no uso de equações para a estimativa do módulo de elasticidade.

Em relação ao comportamento mecânico do concreto com o uso de RCC para substituição do AN, estudos descrevem relações na ordem de 7% a 11,4% da razão da ruptura das resistências de tração pela compressão do concreto (Çakir, 2014). Referidas perdas de resistência mecânica são minoradas com a utilização de processos alternativos, como a lavagem do RCC, que apresentou viabilidade tanto no estado fresco do concreto – trabalhabilidade – como no estado endurecido – resistência (Pepe *et al.*, 2014). Também consta na literatura técnica não ser essencial a segregação dos RCC antes de sua utilização (Salles *et al.*, 2021). Outra metodologia empregada foi a análise da composição granulométrica dos agregados, permitindo a aplicação de conceitos referentes ao empacotamento dos grãos (Andrade *et al.*, 2020). No caso do agregado miúdo natural, sua substituição em até 50% atingiu valores de resistência à compressão, aos 28 dias, de 60 MPa (Anoni; Trigo; Pietrobon, 2020). Ainda em relação ao tema, foi possível identificar, na literatura técnica, estudos afirmando que a substituição do AN por RCC não compromete o comportamento mecânico do concreto quando comparado ao concreto de referência (Andrade *et al.*, 2020; Rodrigues; Fucale, 2014).

Diante do exposto, é reconhecida a relevância do tema, exigindo-se uma maior profundidade de estudos sobre o comportamento mecânico do concreto com substituição de AN por RCC. Assim, este estudo teve como objetivo a análise do comportamento de aderência entre as barras de aço em concretos com substituição de porcentagens de AN miúdos por RCC. O estudo proposto adotou o método de dosagem da ABCP para determinação dos traços dos concretos, considerando as caracterizações obtidas por meio dos ensaios de AN e agregados mistos (AM – substituição parcial do AN pelo RCC), e analisou as tensões de aderência com teores de substituição nos valores de 0%, 10%, 25% e 50% (em massa), por meio de ensaios “*pull-out test*”.

O restante deste artigo é dividido da seguinte forma: na seção 2 é descrito o ensaio mecânico “*pull-out test*”, assim como o referencial teórico para obtenção, de forma analítica, das tensões mínimas necessárias de aderência, de acordo com a RILEM – CEB – FIP (1978) e a NBR 6118 (ABNT, 2014). Posteriormente, na seção 3, é apresentada a metodologia utilizada para a caracterização dos materiais, definição dos traços de concreto, moldagem e cura dos corpos de prova e os ensaios mecânicos realizados para obtenção de resistência à compressão e tração diametral do concreto, assim como da tensão de aderência nos diversos traços elaborados. Por fim, na seção 4, os resultados são apresentados e discutidos conforme a literatura técnica utilizada, possibilitando a conclusão do estudo, realizada na seção 5.

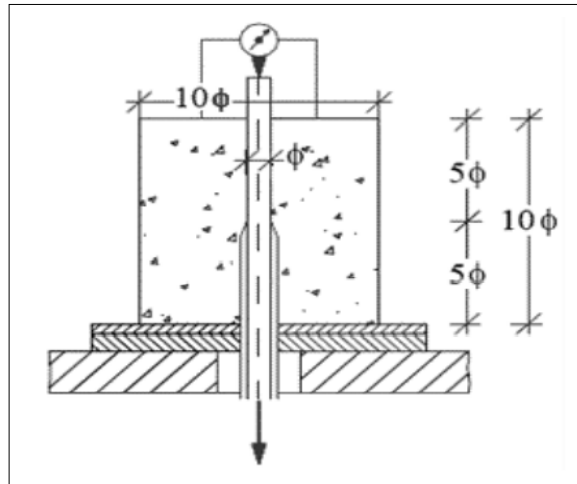
## **2 Ensaio “*pull-out test*”**

A NBR 6118 (ABNT, 2014) indica a ancoragem de armaduras por aderência, que são baseadas no comprimento de ancoragem das barras, o qual pode ser reto ou com um raio de curvatura (gancho), contanto que tenha tamanho suficiente para que ocorra a transferência de esforços da barra para o concreto.

O ensaio de resistência de aderência tem como objetivo medir a resistência de aderência da tração de uma barra de aço em um corpo de prova de concreto colocado sobre placas de apoio em um equipamento de ensaio (Figura 1), como, por exemplo, a normativa RILEM – CEB – FIP (1978).

**Figura 1** ▶

Ensaio "pull-out test".  
Fonte: Passos e Moreno Junior (2018, p. 362)



O referido ensaio descreve que a tensão de aderência é dada pela Equação 1 (Passos; Moreno Junior, 2018).

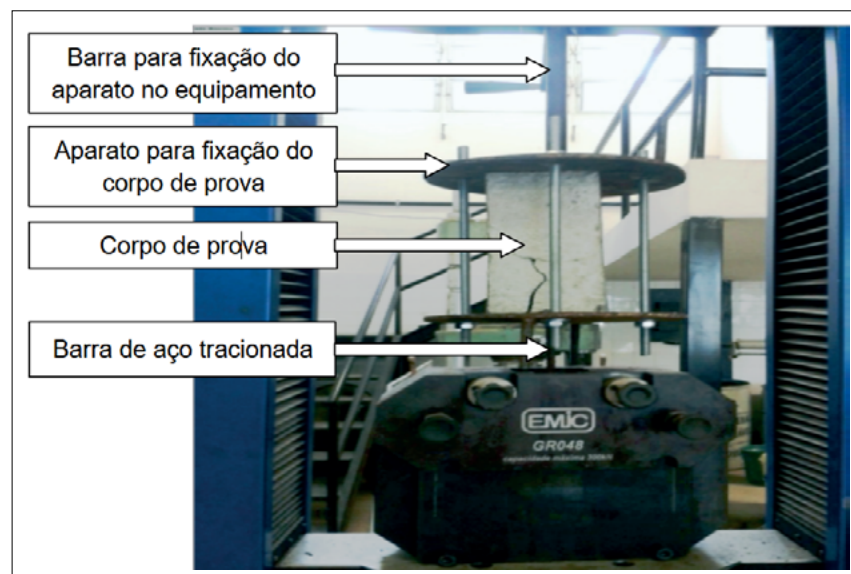
$$\tau_b = \frac{R_s}{(\pi \cdot \phi \cdot l_b)} \quad (1)$$

em que:  $\tau_b$  é a resistência de aderência (em MPa);  $R_s$  é força atuante na barra (em N);  $\phi$  é o diâmetro da barra de aço (em mm);  $l_b$  é o comprimento de ancoragem do segmento de barra de aço no corpo de prova (em mm).

Doria, Sales e Andrade (2015) realizaram um estudo da tensão de aderência de barras em corpos de prova de concreto com o uso de um aparato desenvolvido por eles mesmos, o qual consiste, basicamente, na tração de uma barra de aço imersa em concreto, sobre a qual, a partir da montagem do corpo de prova na prensa, era aplicada força de arrancamento até a falha do mecanismo de aderência (Figura 2). Os valores de tensão dessa aderência foram obtidos com o uso da Equação 1. Para este estudo, foi desenvolvido um aparato semelhante ao dos autores logo acima citados. Os detalhes desse aparato e as informações dos equipamentos utilizados estão registrados na subseção 4.4 desta escrita.

**Figura 2** ▶

Aparato para o ensaio de "pull-out test".  
Fonte: Doria, Sales e Andrade (2015, p. 609)



A análise da força de ruptura foi calculada com os mesmos parâmetros indicados na Equação 1. O valor da tensão de aderência exigido pela RILEM – CEB – FIP (1978) é dado pela Equação 2.

$$\tau_{bm} \geq 8,0 - 0,12 \cdot \phi \quad (2)$$

em que:  $\tau_{bm}$  é a resistência média de aderência (em MPa);  $\phi$  é o diâmetro da barra (em mm).

## 2.1 Tensão de aderência da normativa brasileira

A resistência de aderência de cálculo, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), entre a armadura e o concreto, no caso de armaduras passivas, é dada pela Equação 3 – os valores que devem ser substituídos são apresentados nas Equações 4 a 8.

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} \quad (3)$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c}; \text{ para classes de concreto até C 50} \quad (4)$$

$$f_{ctk,inf} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (5)$$

$$\eta_1 = \{1,0 \text{ para barras lisas } 1,4 \text{ para barras entalhadas } 2,25 \text{ para barras nervuradas}\} \quad (6)$$

$$\eta_2 = \{1,0 \text{ para situação de boa aderência } 0,7 \text{ para situação de má aderência}\} \quad (7)$$

$$\eta_3 = \left\{ 1,0 \text{ para } \phi < 32 \text{ mm } \frac{(132 - \phi)}{100} \text{ para } \phi \geq 32 \text{ mm} \right\} \quad (8)$$

nas quais:  $f_{ck}$  é a resistência característica de compressão do concreto;  $f_{ck,inf}$  é a resistência característica inferior do concreto à tração;  $f_{ctd}$  é a resistência à tração de cálculo do concreto;  $f_{bd}$  é a resistência de aderência de cálculo da armadura passiva (em MPa);  $\gamma_c$  é o coeficiente de ponderação da resistência do concreto;  $\eta_1$  é uma variável determinada em função da rugosidade das barras (lisas, entalhadas ou nervuradas);  $\eta_2$  é uma variável definida pela situação na qual se encontra a barra no concreto (região de boa ou má aderência);  $\eta_3$  é um coeficiente determinado em função do diâmetro da barra;  $\phi$  é o diâmetro da barra.

Assim, é possível verificar que a resistência de aderência é dada em função do arranjo da armadura no concreto e de suas propriedades de rugosidade e diâmetro, não sendo encontradas formulações que determinem a influência do uso de RCC em substituição a agregados finos naturais.

### 3 Método da pesquisa

Para a realização da pesquisa, foi avaliada a aderência entre barra de aço e concreto, com base no método utilizado no trabalho de Doria, Sales e Andrade (2015). Fixou-se o diâmetro da barra de aço em 10 mm com coeficiente de aderência ( $\eta_1$ ) igual a 2,25 e comprimento de ancoragem no concreto de 10 vezes o diâmetro (100 mm) e variou-se o agregado miúdo de concreto, executado com agregados mistos (AM) com substituições do AN por RCC (subseção 4.1) nas porcentagens de 0%, 10%, 25% e 50%, resultando, respectivamente, no traço controle, traço com 10% de RCC, traço com 25% de RCC e traço com 50% de RCC (TRC, TR10, TR25, TR50).

Para cada mistura de concreto foram moldados 25 corpos de prova, sendo 5 corpos de prova para ensaios de compressão axial, 5 corpos de prova para ensaios de tração diametral, 5 corpos de prova para ensaios de absorção e 10 corpos de prova para o ensaio de “pull-out test”.

#### 3.1 Ensaios de caracterização dos agregados

Os ensaios de caracterização dos agregados foram realizados tanto para os agregados naturais (AN) como para o agregado misto (mistura do agregado miúdo natural com RCC). Para a produção do agregado misto (AM), foi inicialmente obtido o consumo do material para o concreto controle (TRC) pelo método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), elaborado por Rodrigues (1984).

Posteriormente, foram misturados os AM, sendo, primeiramente, retirada parte do agregado natural e adicionado o RCC, nas quantidades de 10%, 25% e 50% da massa do AN. Cada mistura foi identificada com sua respectiva proporção de RCC, sendo AM10, AM20 e AM50 as nomenclaturas adotadas.

A caracterização dos agregados foi realizada utilizando-se os procedimentos da NBR 17054 (ABNT, 2022) para análise granulométrica (AN e AM); da NBR NM 52 (ABNT, 2009c), para massa específica do agregado miúdo (AN e AM); da NBR NM 53 (ABNT, 2009d), para o ensaio de massa específica do agregado graúdo (AN); e da NBR NM 45 (ABNT, 2006), para o ensaio de massa unitária (AN e AM).

A porcentagem para a substituição dos agregados foi adotada até o limite de 50%, procedimento baseado na análise da literatura técnica realizada por Silva e Melo (2022), que indica uma concentração de estudos com percentuais de substituição de AN por RCC entre 20% e 50%.

Ressalta-se que este estudo utilizou os AM com as parcelas de substituições em massa para a confecção de novos traços de concreto a partir da caracterização de cada tipo de agregado definido. Referida metodologia foi adotada por não haver um método definido para a determinação de traços de concreto com o uso de RCC.

#### 3.2 Traços de concreto

A determinação do traço passou por três etapas: verificação das características dos agregados a serem utilizados (dados obtidos a partir dos ensaios de caracterização dos materiais); definição das características esperadas do concreto (resistência, consistência



e durabilidade); e obtenção da composição do concreto por meio do método de dosagem da ABCP.

A resistência adotada para o concreto foi de 25 MPa com consistência mínima de  $50 \pm 10$  mm, respeitando-se a NBR 8953 (ABNT, 2015), para concreto grupo C25 e classe S50, respectivamente.

Os traços de referência foram definidos por meio das propriedades dos materiais. No caso de misturas com a substituição de AN por AM, as propriedades do AM foram utilizadas para a definição das composições. Essa consideração pode ser observada na proporção de agregado fino nos traços de referência indicados na Tabela 1.

**Tabela 1** ▶

Traços de referência.

Fonte: dados da pesquisa

Concreto	Traço
TRC	1:1,898:2,813:0,475
TR10	1:1,848:2,854:0,475
TR25	1:1,847:2,844:0,475
TR50	1:1,697:2,970:0,475

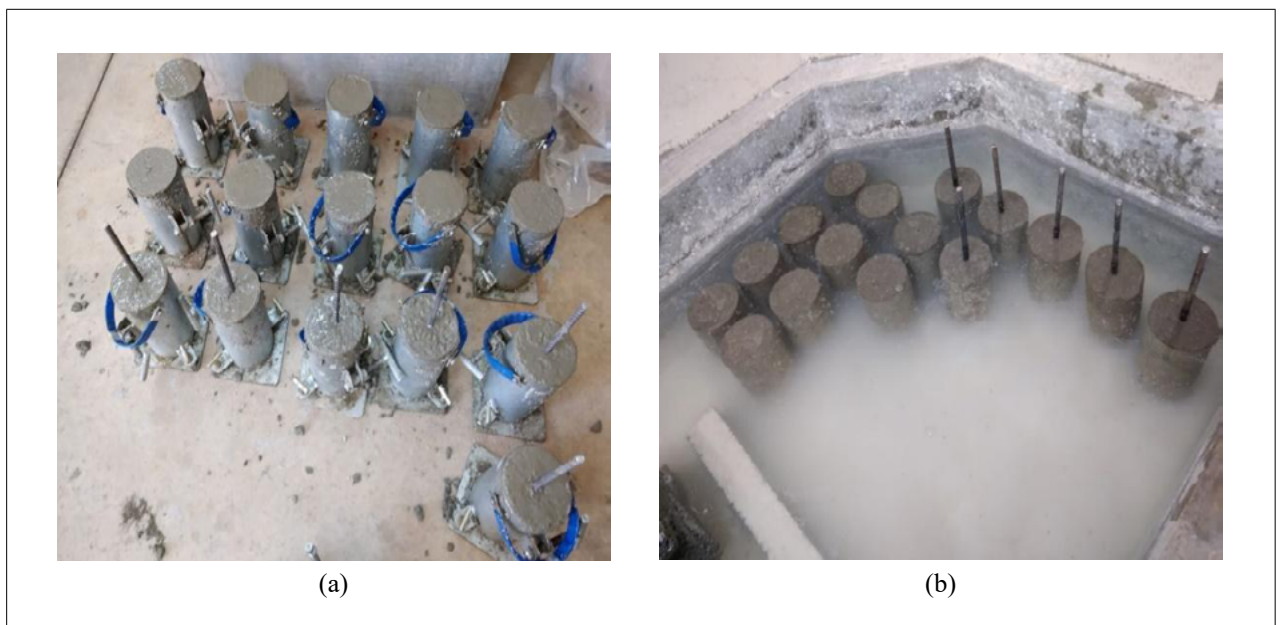
### 3.3 Moldagem e cura dos corpos de prova

O processo de moldagem e cura dos corpos de prova foi realizado de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016). Foram produzidos, para o concreto controle, 25 corpos de prova (Figura 3a), sendo 10 deles produzidos, cada um, com um segmento de barra de aço, de 10 mm de diâmetro, inserido durante a concretagem (concreto ainda no estado fresco), numa profundidade de 100 mm, ou seja, dez vezes o diâmetro nominal da barra. Durante a inserção das barras no concreto, foram tomados cuidados para se respeitar, ao máximo, a perpendicularidade das barras em relação à face superior dos moldes.

**Figura 3** ▼

Corpos de prova: (a) moldados e (b) desmoldados no tanque de cura por imersão.

Fonte: arquivo dos autores



É recomendada, quando ocorre o uso de RCC para a produção de concretos, uma análise quanto ao índice de absorção do material, visto que sua porosidade absorve uma maior quantidade de água quando comparado aos AN (Andrade *et al.*, 2020). Para essa situação, optou-se por realizar um procedimento simples de correção da água durante o processo de moldagem, em função do seu abatimento; assim, durante a moldagem, foram realizados ensaios de *slump* no concreto fresco e, devido à diminuição do abatimento para as composições TR25 e TR50, foram adicionados 11,1% e 25,7% (em relação ao volume inicial de água) para a correção do *slump*, com o objetivo de atender ao valor fixado de  $50 \pm 10$  mm.

Conforme orienta a norma NBR 5738 (ABNT, 2016), após a moldagem, nas primeiras 24 horas, os corpos de prova foram armazenados em local protegido de intempéries, sendo devidamente cobertos com material não reativo e não absorvente; posteriormente à cura inicial de 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e submersos em água por 28 dias (Figura 3b).

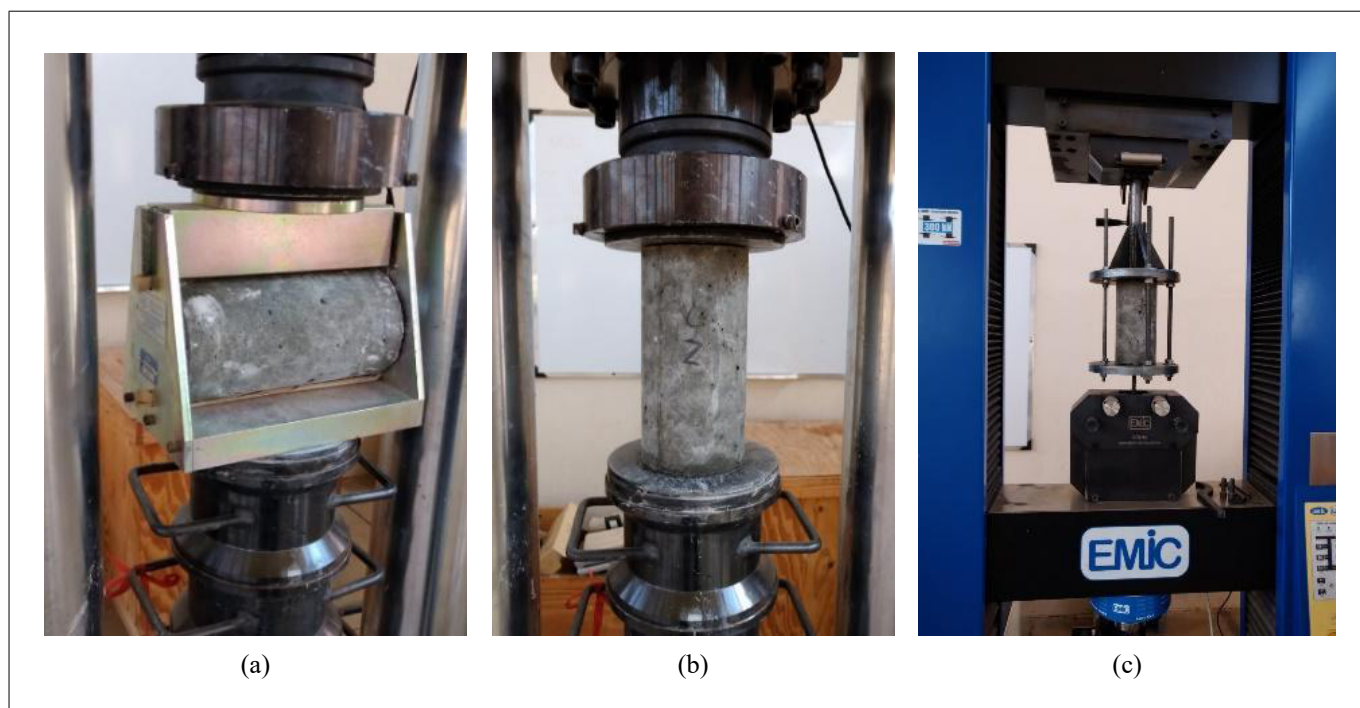
### 3.4 Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos de resistência à tração por compressão diametral e de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos foram realizados de acordo com as normas NBR 7222 (ABNT, 2011) (Figura 4a) e NBR 5739 (ABNT, 2018) (Figura 4b), respectivamente. Todos os corpos de prova foram ensaiados dentro da tolerância de até 24 horas após a retirada da cura submersa, permitida pela norma NBR 5739 (ABNT, 2018), com 28 dias de idade. Para determinação do índice de absorção de água dos corpos de prova, seguiram-se as diretrizes da NBR 9778 (ABNT, 2009b).

#### Figura 4 ▼

Ensaios mecânicos: (a) tração diametral, (b) compressão e (c) arranchamento.

Fonte: arquivo dos autores



O principal ensaio (Figura 4c) ocorreu conforme realizado por Doria, Sales e Andrade (2015), sendo que o aparato utilizado foi confeccionado para a realização do estudo (Figura 4c). O referido aparato é composto por uma barra lisa de 2", na



**Figura 5 ▼**

Aparato construído para ensaio “pull-out test”.

Fonte: arquivo dos autores

parte superior, para fixação na prensa utilizada, e por duas chapas de aço lisas, presas por 5 parafusos de barras roscáveis de ½”. A barra imersa no concreto é tracionada pela prensa com a fixação na parte inferior. O aparato com a fixação do corpo de prova é ilustrado na Figura 5. A prensa utilizada para os ensaios é da marca EMIC, com capacidade de 300 kN.



O ensaio de arrancamento teve como critério de parada a ruptura do corpo de prova por meio da falha do concreto ou da barra de aço, não sendo identificado o segundo comportamento nos ensaios realizados.

## 4 Resultados e discussão

Os resultados dos ensaios são expostos nesta seção, na qual é apresentada a caracterização dos agregados e das misturas com o uso de RCC, com valores de granulometria, massa específica e massa unitária. Posteriormente, os dados das resistências mecânicas dos corpos de prova e dos ensaios de “pull-out test” são descritos. A seção também apresenta a discussão e análise dos dados, considerando-se o comportamento mecânico obtido, visando identificar a influência do uso de RCC no fenômeno estudado.

### 4.1 Misturas dos agregados

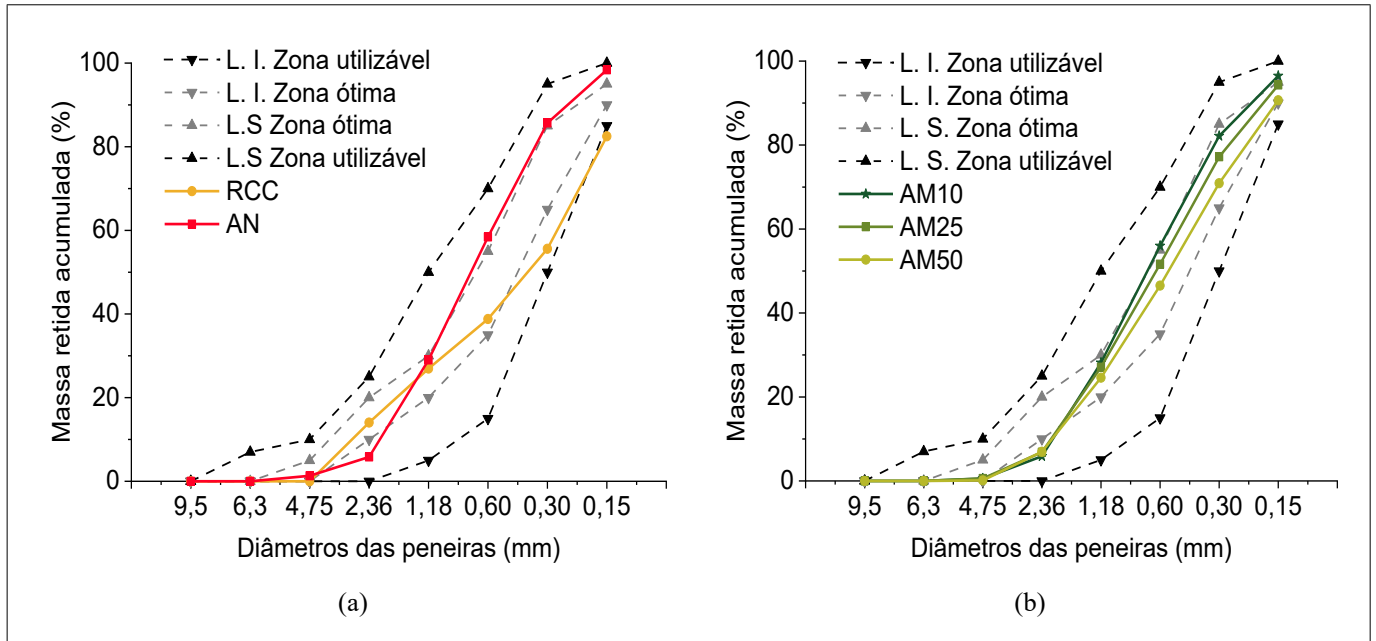
Os resultados referentes às curvas granulométricas tanto do AN quanto dos RCC estão expostos na Figura 6a. A evolução da curva granulométrica dos AM, de acordo com a porcentagem de substituição, é mostrada na Figura 6b. É possível observar

**Figura 6 ▼**

Curva granulométrica:  
(a) areia e resíduo da construção civil; (b) agregados mistos.

Fonte: dados da pesquisa

que o AN, os RCC e os AM se encontram na zona utilizável, conforme preconiza a NBR 7211 (ABNT, 2009a). Outra característica observada dos AM foi o coeficiente de uniformidade, que indica que as misturas apresentaram uma melhor graduação, ou seja, um melhor preenchimento dos vazios (Tabela 2).



**Tabela 2 ►**

Propriedades dos materiais utilizados como agregados.

Fonte: dados da pesquisa

Características	Brita	AN	RCC	AM10	AM20	AM50
$\rho_{compactada}$ (g/cm <sup>3</sup> )	–	1,637	1,404	1,641	1,591	1,553
$\rho_{solta}$ (g/cm <sup>3</sup> )	–	1,568	1,277	1,571	1,511	1,497
$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	–	2,646	2,451	2,625	2,611	2,565
$\varnothing_{m\acute{a}x}$ (mm)	25	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
M.F.	6,67	2,79	2,18	2,69	2,58	2,40
C. Unif.	1,76	3,92	7,25	4,27	4,63	5,20

Nota:  $\rho_{compactada}$  – massa unitária compacta;  $\rho_{solta}$  – massa unitária solta;  $\gamma$  – massa específica,  $\varnothing_{m\acute{a}x}$  – diâmetro máximo; M.F. – módulo de finura; C. Unif. – coeficiente de uniformidade.

Resultados semelhantes em relação ao teor de finos com o uso de agregados foram obtidos por Rodrigues e Fucale (2014) e Anoni, Trigo e Pietrobon (2020) – sendo verificado que o uso de RCC permitiu um melhor preenchimento dos vazios ainda dentro das zonas de utilização – e, conseqüentemente, também apresentaram uma melhor graduação.

A origem do RCC utilizado parte de um processo de beneficiamento pela empresa fornecedora, ocorrendo inicialmente a retirada de materiais como plásticos e metais; posteriormente a essa etapa, ocorre a trituração e separação – por tipos de material, em função da granulometria –, através de peneiramento, resultando

em agregados miúdos e graúdos (areias) e só graúdos, com diversas numerações (ex. brita 0, brita 1, ...). Apesar desse beneficiamento, o RCC é um material com grande heterogeneidade em sua composição, influenciando nas características dos concretos (Andrade *et al.*, 2020). A Figura 7 (próxima página) indica os materiais segregados pelo ensaio de granulometria, que seguiu as diretrizes da NBR 17054 (ABNT, 2022).

**Figura 7** ▶

Segregação do RCC pelo ensaio de granulometria.  
Fonte: arquivo dos autores



Os valores de massa específica obtidos do RCC, quando comparados ao AN, são menores, característica adquirida em função da presença de um maior número de poros nas partículas sólidas (Rodrigues; Fucale, 2014). Para os valores de massa unitária compactada e solta, foi possível observar que o valor do AM10, quando comparado ao AN, por ser maior, indicou um melhor preenchimento dos vazios. Isso se deve à porcentagem de finos no RCC que preenchem os vazios do AN.

#### 4.2 Propriedades mecânicas dos corpos de prova

**Tabela 3** ▼

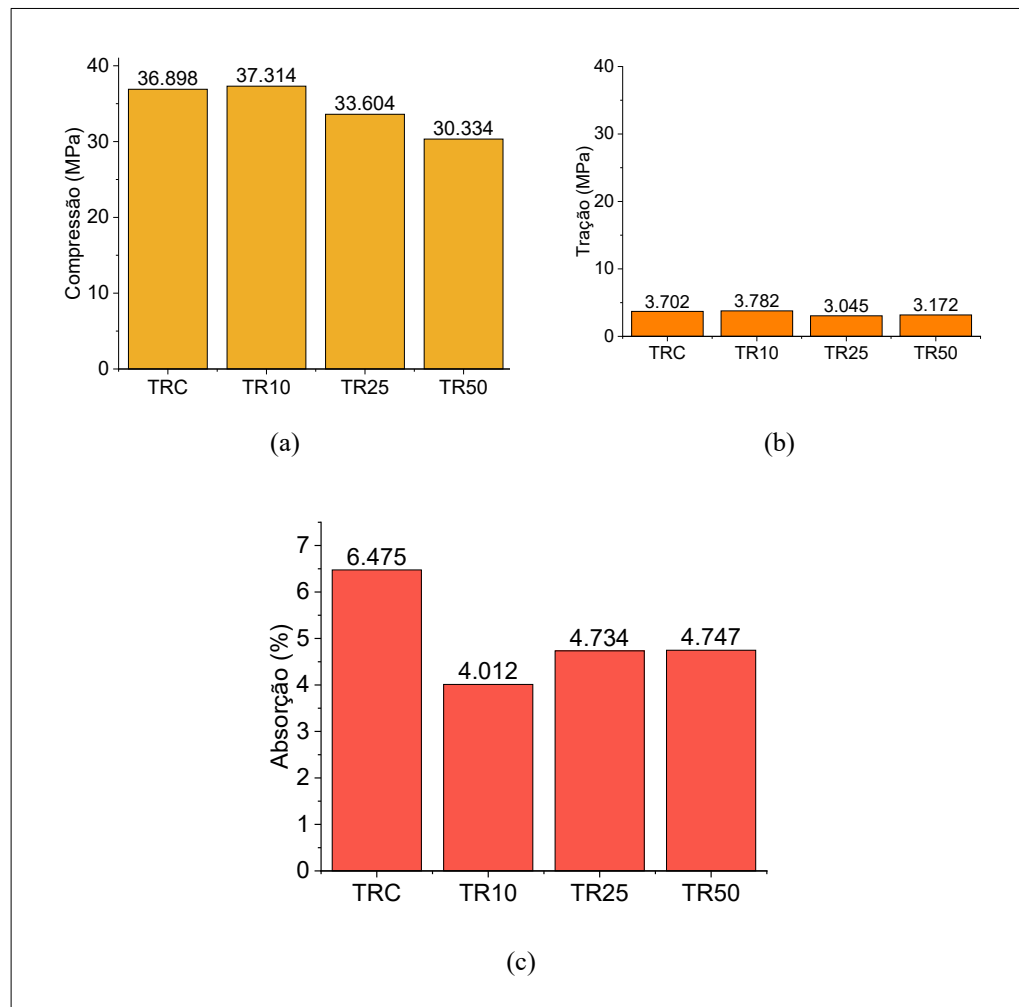
Ensaio dos corpos de prova cilíndricos (valores médios).  
Fonte: dados da pesquisa

A resistência mecânica dos corpos de prova TR10, para os ensaios de compressão e tração diametral, apresentou valores superiores, quando comparados ao TRC, o que não ocorreu para os ensaios realizados para os traços TR25 e TR50 (Tabela 3 e Figuras 8a e 8b).

Corpo de prova	Compressão (MPa)	Tração (MPa)	M <sub>seca</sub> (kg)	M <sub>saturada</sub> (kg)	Absorção (%)
TRC	36,898	3,702	3,636	3,871	6,475
TR10	37,314	3,782	3,756	3,906	4,012
TR25	33,604	3,045	3,659	3,832	4,734
TR50	30,334	3,172	3,606	3,778	4,747

**Figura 8** ▶

Resultados dos ensaios:  
(a) compressão,  
(b) tração diametral e  
(c) absorção de água.  
Fonte: dados da pesquisa



Com base nos valores de resistência à tração e à compressão, os valores obtidos em todos os corpos de prova estão de acordo com o indicado por Çakir (2014), que descreve uma relação na ordem de 7% a 11,4%.

Em análise dos valores obtidos nos ensaios de absorção de água, verificou-se que os corpos de prova dos traços TR10, TR25 e TR50 indicaram menores índices (Tabela 3 e Figura 8c). Esse comportamento pode ser explicado pelo preenchimento dos vazios devido à presença do RCC, processo descrito na subseção 4.1.

Com os dados da Tabela 3 ilustrados na Figura 8, é possível observar que as resistências de compressão e tração diametral e a absorção de água apresentaram melhores resultados para o TR10, ou seja, com um teor de 10% de substituição dos AN pelo RCC, ambos os resultados podem ser considerados benéficos para o concreto. Apesar de os resultados de resistência mecânica para os corpos de prova TR25 e TR50, quando comparados ao TRC, terem sido inferiores, ainda assim foram satisfatórios, considerando-se as resistências iniciais previstas para a dosagem do concreto, estimadas em 25 MPa para compressão.

Rodrigues e Fucale (2014) obtiveram resultados da resistência mecânica com pouca interferência na produção de concretos com substituição de agregados miúdos por RCC. A redução da resistência mecânica foi de 3,6%, quando comparada ao concreto de referência, em ensaios realizados aos 28 dias e traço 1:5. A substituição realizada pelos autores foi de 50% do AN pelo RCC. Os valores obtidos nos ensaios realizados com o uso do AM50 tiveram uma diminuição de 17,7% de resistência à compressão aos 28 dias com

o traço desenvolvido na pesquisa (1:4,5). A diferença do comportamento da resistência mecânica identificada pode ser justificada em função do RCC utilizado por Rodrigues e Fucale (2014), pois, conforme indicado pelos autores, a amostra tinha uma maior porcentagem de material cimentício.

Os resultados para o índice de absorção de água nos corpos de prova também apresentaram uma divergência do comportamento obtido por Rodrigues e Fucale (2014), que, diferentemente dos resultados desses autores, indicaram uma diminuição do índice de absorção de água. No entanto, os resultados estão de acordo com o obtido para os corpos de prova com 50% de substituição no estudo de Anoni, Trigo e Pietrobon (2020), visto que a origem do RCC é coincidente com o utilizado por esses autores.

A massa dos corpos de prova obtida no estado seco apresentou uma variação em função da substituição dos agregados. Ainda de acordo com Rodrigues e Fucale (2014), a substituição dos AN por RCC (agregados miúdos) apresenta concretos com menor massa específica e valores de resistência mecânica menores, quando comparados aos concretos de referência. No entanto, para o caso da composição TR10, observou-se um aumento da resistência mecânica, além de um valor maior de massa seca, ou seja, para esse caso, a mistura permitiu um bom empacotamento dos grãos, diminuindo os vazios do concreto endurecido, o que pode ser percebido para os resultados de absorção de água. Para os outros concretos (TR25 e TR50), os valores de absorção também indicaram um melhor preenchimento dos vazios, quando analisado o índice de absorção de água. Nesse caso, verificou-se que os valores obtidos com o TR10 são superiores aos valores obtidos nas composições TR25 e TR50, o que pode ser justificado por um melhor empacotamento dos grãos, quando analisados pela massa específica dos materiais e corpos de prova indicados nas Tabelas 2 e 3.

### 4.3 Resultados do ensaio de arrancamento “pull-out test”

O resultado do principal ensaio da pesquisa foi obtido por meio da Equação 1 e expresso na Tabela 4, sendo que todos os corpos de prova atenderam ao valor mínimo estipulado pela RILEM – CEB – FIP (1983) de 6,8 MPa, por meio da Equação 2, e pela NBR 6118 (2014) de 4,03 MPa, considerando os valores de projeto por meio da Equação 3, ou seja, com o coeficiente  $\gamma_c$  igual a 1,4. É possível observar que a composição TR10 apresentou um aumento de aproximadamente 20% para o arrancamento da barra. Esse comportamento pode estar associado ao preenchimento dos vazios proporcionado pela inserção de RCC no AN, promovendo melhor ligação na interface aço *versus* concreto.

**Tabela 4** ►

Resultados do ensaio de arrancamento e relações em função das resistências.  
Fonte: dados da pesquisa

Tipo	$\tau_b$ (MPa)	$\tau_b / f_c$	$\tau_b / f_{ct}$	$\tau_b / a\%$
TRC	10,965	0,297	2,961	1,693
TR10	12,654	0,339	3,345	3,154
TR25	10,790	0,321	3,544	2,279
TR50	9,231	0,304	2,910	1,944

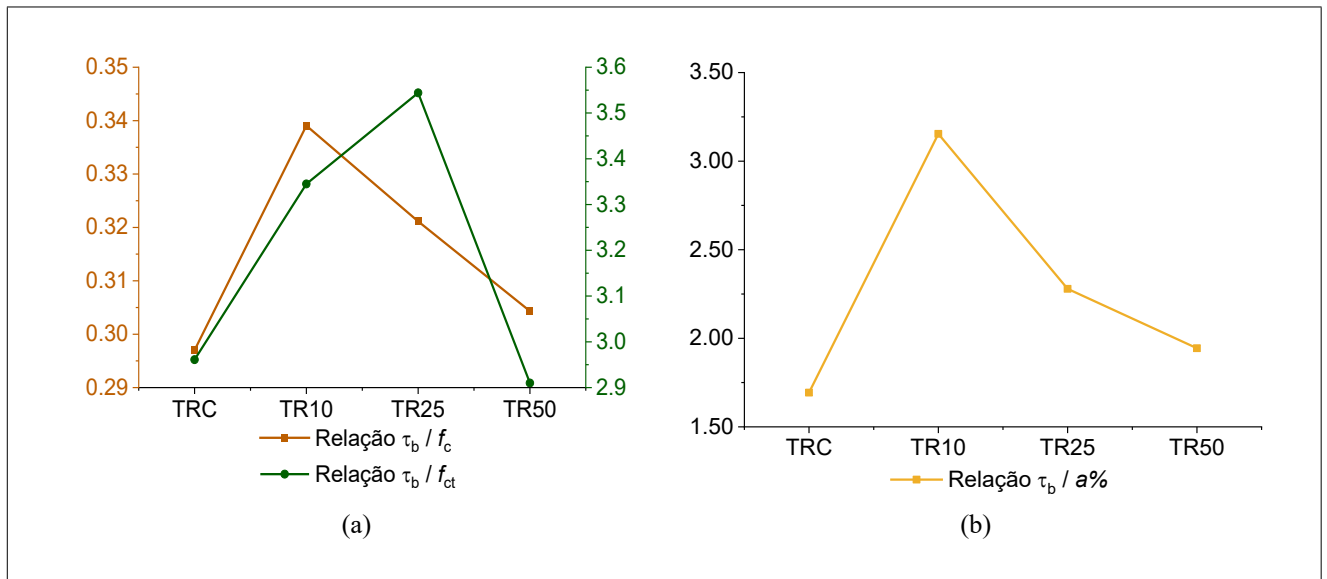
Os resultados da tensão de aderência ( $\tau_b$ ) foram normalizados considerando-se os valores de resistência à compressão ( $f_c$ ), à tração diametral ( $f_{ct}$ ) e o índice de absorção de água ( $a\%$ ), indicados pelas colunas  $\tau_b / f_c$ ,  $\tau_b / f_{ct}$  e  $\tau_b / a\%$ , respectivamente, na Tabela 4. Referida análise teve como objetivo identificar o comportamento das resistências da tensão



de aderência e o comportamento mecânico dos concretos confeccionados. O critério de normalização foi adotado para análise considerando o procedimento efetuado por Su *et al.* (2021).

**Figura 9 ▼**  
Normalização dos valores de tensão de aderência.  
Fonte: dados da pesquisa

As Figuras 9a e 9b ilustram os resultados indicados na Tabela 4, sendo possível observar relações da resistência de aderência com as resistências mecânicas do concreto. No caso da  $\tau_b/f_c$ , quando seu valor é maior, este representa uma porcentagem superior da resistência de aderência em função da resistência à compressão. Assim, referida propriedade apresentou melhor comportamento mecânico na composição TR10.



Para os valores plotados referentes à resistência de aderência em função da resistência à tração diametral ( $\tau_b/f_{ct}$ ) (Figura 9a), é possível observar que o concreto TR10 obteve uma menor relação de ganho em função da resistência à tração. Esse comportamento pode ser observado pelo baixo ganho que o concreto TR10 obteve na tração diametral, conforme ilustrado na Figura 8b.

Os valores de  $\tau_b/a\%$  (Figura 9b) possuem, devido à baixa absorção de água em relação à resistência de aderência, um comportamento similar à curva  $\tau_b/f_c$ , sugerindo que, quanto menor o índice de absorção de água, melhor será a relação da resistência de aderência das barras no concreto em função da resistência à compressão, o que pode ser explicado pelo menor índice de vazios do concreto.

A substituição de AN por RCC pode vir a prejudicar a tensão de aderência, conforme citam Dong *et al.* (2019); no entanto, esse comportamento foi observado somente nas composições TR25 e TR50. No concreto TR10, o comportamento identificado foi de ganho da resistência mecânica à compressão. Essa constatação sugere o benefício da utilização dos agregados em teores de substituição na ordem de 10% dos AM, através da metodologia adotada na pesquisa.

Em análise, todos os corpos de prova submetidos aos ensaios “pull-out test” obtiveram resultados médios superiores ao mínimo estipulado pela RILEM – CEB – FIP (1978) de 6,8 MPa e pela NBR 6118 (ABNT, 2014), indicando que o uso de resíduos da construção civil como substituição dos agregados miúdos produziu concretos com aderência mínima, conforme exigida, para os ensaios realizados no estudo.

Dong *et al.* (2019) verificaram que a inserção de RCC em vigas de concreto apresentou uma perda significativa da tensão de aderência. No entanto, os autores efetuaram a substituição dos agregados graúdos por RCC e, após a substituição de 100% desse material, efetuaram o procedimento de substituição do agregado miúdo. Nesse contexto, é possível dizer que a utilização de agregados graúdos e miúdos de RCC, quando utilizados em conjunto e também em sua totalidade, pode apresentar um comportamento diferente do obtido neste estudo.

Os resultados obtidos por Passos e Moreno Junior (2018), com a substituição parcial e total dos agregados graúdos por resíduos de cerâmicas, indicaram que, apesar da perda da resistência à compressão de forma significativa, a tensão de aderência apresentou valores maiores. Apesar de a substituição do tipo de agregado diferir do adotado neste estudo, foi possível verificar que as tensões de aderência apresentam maior interferência com o uso de agregados miúdos, o que também foi observado por Dong *et al.* (2019).

## 5 Conclusões

Neste trabalho, foi avaliada a resistência de aderência de concretos produzidos com agregados provenientes de resíduos da construção civil e barras de aço, com o intuito de contribuir para o estudo da fabricação de concretos estruturais e com vistas à sustentabilidade na construção civil. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização das misturas, resistência mecânica à compressão e à tração diametral, índice de absorção de água e verificação das tensões de aderência, por meio do ensaio “*pull-out test*”. Com base nos resultados, as seguintes considerações foram efetuadas:

- 1) O uso de RCC pode vir a contribuir na resistência à compressão de concretos, atingindo valores superiores aos mínimos exigidos pela NBR 8953 (ABNT, 2015), baseados em processos de dosagem já consagrados. Apesar de os resultados atingidos serem satisfatórios, os processos de dosagem com o uso de resíduos ainda necessitam de contribuições para melhor entendimento de seu comportamento, haja vista a variabilidade da composição do material;
- 2) Os valores de resistência mecânica à compressão e à tração diametral nos corpos de prova, com substituição de agregados miúdos no teor de 10%, atingiram valores superiores, quando comparados ao concreto referência. Esse comportamento pode ser explicado pelo melhor preenchimento dos vazios e comprovado pela massa específica das misturas de agregados, estes também observados no peso dos corpos de prova com o mesmo teor de substituição. Sugere-se uma investigação mais aprofundada para o comportamento da aderência do concreto com substituição de agregados miúdos considerando a variabilidade dos RCC;
- 3) Os índices de absorção de água, para os concretos com substituição de 10%, apresentaram-se reduzidos nos corpos de prova, o que pode ser explicado pela compactidade da mistura, que diminui a porosidade do concreto e dificulta a absorção de água. A literatura técnica indica um comportamento diferente do obtido, o que justifica a necessidade de estudos mais aprofundados sobre a substituição dos agregados miúdos por RCC;
- 4) Para os ensaios de arrancamento, as composições com o uso do agregado AM10 apresentaram valores superiores, quando comparados ao concreto controle. Para as outras misturas (25% e 50%), apesar da diminuição das resistências, os valores atingidos ainda são superiores ao mínimo necessário de 6,8 MPa, conforme o ensaio adotado;

- 5) Os valores obtidos pela relação da tensão de aderência em função das resistências mecânicas à compressão e à tração diametral, e também pelos índices de absorção de água, permitiram correlacionar que os melhores desempenhos mecânicos para aderência são obtidos com um menor índice de absorção de água.

O agregado AM10 apresentou um melhor desempenho tanto para a resistência do concreto como para a tensão de aderência na interface aço/concreto. Acredita-se, no entanto, ser válida uma análise sobre a perda de tensão em função da substituição dos teores de concreto para estimativas de perda de aderência, verificando-se, em fases de projeto, requisitos para o uso dos resíduos a serem incorporados no concreto com atendimento aos valores mínimos exigidos.

Por fim, propõe-se que sejam realizados novos ensaios para obtenção de resultados que abranjam situações além das consideradas no estudo e com um maior número de amostragem.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem à empresa Mejan Ambiental pelo fornecimento do RCC, que possibilitou a realização do estudo.

## **Financiamento**

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

## **Conflito de interesses**

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

## **Referências**

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

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

ABNT – 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: ABNT, 2011.

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

ABNT – 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: ABNT, 2009b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

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

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

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

ANDRADE, G. P.; POLISSENI, G. C.; PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D. Design of structural concrete mixtures containing fine recycled concrete aggregate using packing model. **Construction and Building Materials**, v. 252, 119091, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119091>.

ANONI, L. G.; TRIGO, A. P. M.; PIETROBON, I. M. Produção de concretos estruturais utilizando resíduos de construção e demolição. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (CBC2020), 62., 2020, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: IBRACON, 2020.

BAENA, M.; TORRES, L.; TURON, A.; LLORENS, M.; BARRIS, C. Bond behaviour between recycled aggregate concrete and glass fibre reinforced polymer bars. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 449-460, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.145>.

BINS, G. O.; ARROYO, F. N.; CHRISTOFORO, A. L.; PANZERA, T. H.; SILVA, D. A. L. Análise de pisos intertravados com substituição do agregado miúdo por resíduo de construção e demolição. **Revista Principia**, v. 59, n. 2, p. 427-444, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id4975>.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos [...]. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm). Acesso em: 24 ago. 2022.

ÇAKIR, Ö. Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral additives. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 17-25, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.032>.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, DF: CONAMA, 2002. Disponível em: [https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2002\\_Res\\_CONAMA\\_307.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2002_Res_CONAMA_307.pdf). Acesso em: 24 ago. 2022.

DONG, H.; SONG, Y.; CAO, W.; SUN, W.; ZHANG, J. Flexural bond behavior of reinforced recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 213, p. 514-527, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.238>.

DORIA, M. R.; SALES, A. T. C.; ANDRADE, N. F. A. Bond strength between steel-concrete and between concretes with different ages in structural rehabilitation. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 5, p. 604-624, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952015000500004>.

KIM, S.-W.; YUN, H.-D. Influence of recycled coarse aggregates on the bond behavior of deformed bars in concrete. **Engineering Structures**, v. 48, p. 133-143, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.10.009>.

OLIVEIRA, M. J. E.; ASSIS, C. S. Aderência do aço-concreto produzido com agregado reciclado. **Exacta: Engenharia de Produção**, v. 4, n. 1, p. 135-141, 2006. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/exacta/article/view/664>. Acesso em: 12 nov. 2022.

PASSOS, L.; MORENO JUNIOR, A. L. Estudo da tensão de aderência entre barras de aço e concretos com agregados de resíduos de cerâmica vermelha. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 4, p. 361-375, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000400310>.

PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D.; KOENDERS, E. A. B.; MARTINELLI, E. Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete. **Construction and Building Materials**, v. 69, p. 124-132, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.084>.

PIMENTEL, L. L.; RIZZO, G. F.; JACINTHO, A. E. P. G. A.; FONTANINI, P. S. P. Concrete produced with recycled aggregate: a durability analysis for structural use. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 6, e13613, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1983-41952020000600013>.

RODRIGUES, C. R. S.; FUCALE, S. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, p. 99-111, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000100009>.



RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros da dosagem racional do concreto**. São Paulo: ABCP, 1984. Disponível em: <https://abcp.org.br/parametros-da-dosagem-racional-do-concreto>. Acesso em: 24 ago. 2022.

RILEM – CEB – FIP. Bond test for reinforcing steel. 1. Beam test (7-II-28 D). 2. Pull-Out Test (7-II-128). Tentative Recommendations. **Materials and Structures**, v. 6, n. 32, p. 96-105, 1978.

RILEM – CEB – FIP. **Bond test for reinforcing steel. Beam test, recommendation RC 5**. Paris: Concrete Reinforcement Technology, 1983.

SALLES, P. V.; GOMES, C. L.; POGGIALI, F. S. J.; RODRIGUES, C. S. A importância da segregação do agregado reciclado na resistência e na durabilidade do concreto estrutural. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 3, p. 177-196, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000300545>.

SIEMPU, R.; PANCHARTHI, R. K. Bond characteristics of concrete made of recycled aggregates from building demolition waste. **Magazine of Concrete Research**, v. 69, n. 13, p. 665-682, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1680/jmacr.16.00400>.

SILVA, D. A.; MELO, C. E. L. Agregado reciclado, uma fonte sustentável de matéria-prima: uma revisão. **Revista Principia**, v. 60, n. 2, p. 370-386, 2022. DOI: <https://doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6033>.

SOUSA, F. H. F.; KAZMIERCZAK, C. S.; QUININO, U. C. D. M.; FERNANDES, A. J. M. M.; KULAKOWSKI, M. P. Applicability of models provided by technical standards to estimate the static modulus of elasticity of concretes produced with recycled coarse aggregates. **Structural Concrete. Journal of the fib**, v. 22, n. S1, p. E94-E104, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.201900420>.

SU, T.; WANG, C.; CAO, F.; ZOU, Z.; WANG, C.; WANG, J.; YI, H. An overview of bond behavior of recycled coarse aggregate concrete with steel bar. **Reviews on Advanced Materials Science**, v. 60, n. 1, p. 127-144, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1515/rams-2021-0018>.

XIAO, J.; FALKNER, H. Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel rebars. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 2, p. 395-401, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.008>.

YANG, H.; DENG, Z.; INGHAM, J. M. Bond position function between corroded reinforcement and recycled aggregate concrete using beam tests. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 518-526, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.008>.